



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ Μ/Υ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ  
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»



## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Πρόβλεψη παραγωγής ενέργειας σε αιολικό πάρκο.**

**Αξιολόγηση και εφαρμογές**

**Ιωάννης Ζ. Κουσούλης**

**Επιβλέπων Καθηγητής: Γεώργιος Ματσόπουλος**

ΙΟΥΝΙΟΣ 2019

## Περίληψη

Η αιολική ενέργεια εμφανίζει διαρκώς τεράστια ανάπτυξη, γεγονός που φαίνεται από την συνεχή αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος σε ευρωπαϊκό αλλά και σε παγκόσμιο επίπεδο τα τελευταία χρόνια. Συγκεκριμένα, από 40GW το 2003, πλέον έχουμε φτάσει τα 189GW εγκατεστημένης ισχύος αιολικής ενέργειας για το 2018. Μαζί με την διεύρυνση της αιολικής ενέργειας στα δίκτυα ισχύος έχει αυξηθεί και η ανάγκη πρόβλεψης μετεωρολογικών δεδομένων και κατ'επέκταση αιολικής παραγωγής.

Παρόλο που η αιολική ενέργεια γίνεται όλο και πιο δημοφιλής και είναι από τις πιο οικονομικές από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ο ασταθής χαρακτήρας του ανέμου κάνει δύσκολη την ενσωμάτωσή της στα δίκτυα ισχύος. Για την αντιστάθμιση αυτής της μεταβλητότητας, απαιτούνται μοντέλα πρόβλεψης της αιολικής ισχύος για τις επόμενες ώρες, είτε για τη διαχείριση είτε για το εμπόριο της ενέργειας. Αυτά τα μοντέλα περιγράφονται σε αυτή τη διπλωματική εργασία, και γίνεται μια αναλυτική περιγραφή του τρόπου λειτουργίας τους, των παραμέτρων που τα επηρεάζουν και τον τρόπο παραγωγής των προβλέψεων.

Τέλος, γίνεται μια αναφορά στην αξία της πρόβλεψης παραγωγής και τις εφαρμογές της, όπως για παράδειγμα στην συντήρηση ενός αιολικού πάρκου, στην παρακολούθηση της σωστής λειτουργίας του αλλά και στο κομμάτι της επένδυσης μέσω της εφαρμογής του ευρωπαϊκού μοντέλου ενέργειας και συγκεκριμένα με την είσοδο των εταιρειών ενέργειας στο Ελληνικό Χρηματιστήριο Ενέργειας

### Λέξεις κλειδιά:

Αιολικό πάρκο, αιολική ενέργεια, μοντέλα πρόβλεψης αιολικής ισχύος, αριθμητικές προβλέψεις καιρού

## **Abstract**

Wind energy is rapidly increasing all over the world, which can be easily confirmed by the increase of its installed capacities in european and worldwide level the last years. Specifically, the global installed wind power capacity has increased from 40GW in 2003 to 189GW at the end of 2018. From this increasing wind energy and other renewable energy sources penetration level in the power systems, at the same time, it has been increased the need of meteo data forecasting and wind and by extension the need of wind energy forecasting.

Although wind energy is becoming more and more famous and is one of the most economic renewable energy sources, the unstable character that the wind shows makes its integration to the power systems difficult. For the compensation of this variability, wind power forecast (WPF) models are needed for the next hours, either to be used for its management or the energy trade. These models are described in this diplomatic thesis, and an analytic presentation of their performance, the parameters that has an impact on them and the production of the forecasts is presented.

Finally, there is an full analysis of the value of the production forecast and its applications, such as the maintenance of a wind park, the monitoring of its proper operation and the part of the investment through the implementation of the European energy model, with the participation of energy companies to Greek Energy Stock Market

### **Key words:**

Wind farm, wind energy, wind power forecast, numerical weather predictions

## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εκπονήθηκε στη σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου το ακαδημαϊκό έτος 2018-2019, στα πλαίσια του διατμηματικού μεταπτυχιακού προγράμματος «Τεχνο-οικονομικά Συστήματα». Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κ. Γεώργιο Ματσόπουλο, τόσο για την ανάθεση της συγκεκριμένης εργασίας όσο και για την καθοδήγηση του και τη βοήθεια που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την υποστήριξη που μου έδωσαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Αθήνα, Ιούνιος 2019

Ιωάννης Κουσούλης

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1.1 Γενικά .....	7
1.2 Αιολική Ενέργεια .....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΡΟΒΛΕΨΗ	12
2.1 Αξία πρόβλεψης .....	12
2.2 Αβεβαιότητα πρόβλεψης.....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	14
3.1 Γενικά .....	14
3.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την αιολική παραγωγή .....	14
3.2.1 Ταχύτητα .....	14
3.2.2 Κατεύθυνση .....	15
3.2.3 Πυκνότητα αέρα.....	16
3.3 Χρησιμότητα πρόβλεψης αιολικής παραγωγής .....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ ΚΑΙΡΟΥ	17
4.1 Εισαγωγή .....	17
4.2 Παγκόσμια μοντέλα και μεσοπρόθεσμες προβλέψεις.....	20
4.3 Αφομοίωση δεδομένων για την αρχικοποίηση των μοντέλων .....	21
4.4 Τυποποίηση των μοντέλων ( Model Formulation ).....	22
4.4.1 Βασικά μετεωρολογικά μοντέλα αριθμητικών προβλέψεων καιρού.....	22
4.4.2 Οι εξισώσεις του μοντέλου .....	27
4.5 Η επίδραση του σφάλματος των αριθμητικών προβλέψεων καιρού στην πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου .....	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	30
5.1 Εισαγωγή .....	30
5.2 Χρονικοί ορίζοντες των μοντέλων πρόβλεψης .....	30
5.3 Μοντέλα φυσικών προσεγγίσεων.....	32
5.3.1 Εισαγωγή .....	32
5.3.2 Περιγραφή κυριότερων μοντέλων φυσικών προσεγγίσεων .....	34
5.4 Μοντέλα στατιστικών προσεγγίσεων.....	36
5.4.1 Γενικά.....	36

5.4.2 Περιγραφή κυριότερων μοντέλων στατιστικών προσεγγίσεων.....	37
5.5 Συνδυασμός φυσικών και στατιστικών μοντέλων .....	39
5.6 Προβλέψεις τοπικού χαρακτήρα (αναβάθμιση) .....	40
5.7 Άμεση αναβάθμιση .....	41
5.8 Διαδοχική προσέγγιση.....	42
5.9 Προσέγγιση δέσμης ή υποπεριοχής .....	42
5.10 Εντός λειτουργίας Persistence για την αναβάθμιση των μοντέλων.....	43
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ</b>	<b>45</b>
6.1 Κριτήρια αξιολόγησης μοντέλων πρόβλεψης .....	45
6.2 Χρονοσειρές .....	48
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΙΣΧΥΟΣ</b>	<b>53</b>
7.1 Ερευνητικές μέθοδοι και τεχνικές πρόβλεψης αιολικής ισχύος .....	53
7.2 Λειτουργικά και εμπορικά μοντέλα προβλέψεων αιολικής ισχύος.....	67
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΧΡΗΜΑΤΙΣΤΗΡΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ</b>	<b>74</b>
8.1 Εισαγωγή .....	74
8.2 Συνοπτική περιγραφή αγορών στο νέο μοντέλο .....	76
8.2.1 Χονδρική αγορά προθεσμιακών προϊόντων ηλεκτρικής ενέργειας.....	76
8.2.2 Αγορά επόμενης ημέρας (Day ahead market) .....	77
8.2.3 Ενδοημερήσια αγορά ενέργειας (Intra-day market) .....	80
8.2.4 Αγορά εξισορρόπησης (Balancing market) .....	81
8.3 Επενδύσεις.....	82
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 : ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΡΟΒΛΕΨΕΩΝ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ</b>	<b>83</b>
9.1 Εισαγωγή .....	83
9.2 Δεδομένα .....	83
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b>	<b>86</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>87</b>

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

### 1.1 Γενικά

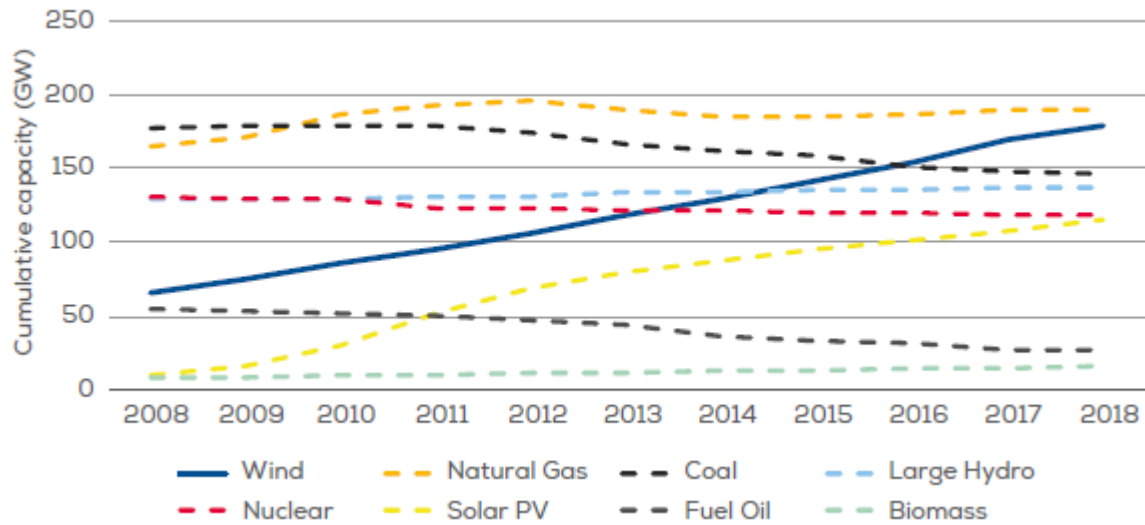
Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας είναι οι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, ήλιος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες.

Οι ανανεώσιμες πηγές δεν εξαντλούνται πρακτικά ποτέ και δε ρυπαίνουν. Τα τελευταία χρόνια γίνεται ολοένα πιο επιτακτική η ανάγκη αξιοποίησης εναλλακτικών μορφών ενέργειας. Εξαιτίας της συνεχώς αυξανόμενης ενεργειακής ζήτησης, σε συνδυασμό με τη μείωση των αποθεμάτων συμβατικών καυσίμων και τις δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον από την εκτεταμένη χρήση τους, το παγκόσμιο ενδιαφέρον στρέφεται στην ανάπτυξη τεχνολογιών των προς εκμετάλλευση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Το ενδιαφέρον αυτό ενισχύεται από το γεγονός ότι σε πολλές περιπτώσεις η τεχνολογία των Α.Π.Ε. όχι μόνο είναι οικονομικά εφικτή αλλά και αρκετά αποδοτική.

Η συνεχής χρήση ορυκτών καυσίμων αλλά και φυσικού αερίου, έχει οδηγήσει στη ραγδαία μείωσή τους και έχει συμβάλει στην υποβάθμιση του περιβάλλοντος και την ανάπτυξη του φαινομένου του θερμοκηπίου. Σε παγκόσμια κλίμακα, το ενδιαφέρον πολλών χωρών έχει στραφεί στη χρήση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), τη λήψη νέων μέτρων και την εφαρμογή νέων πολιτικών με στόχο την ελαχιστοποίηση των αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον.

Στα πλαίσια μίας τέτοιας προσπάθειας, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει τον φιλόδοξο στόχο για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 80-95% το έτος 2050 βασιζόμενη στη χρήση ΑΠΕ και την προώθηση αυτών. Επειδή όμως το 2050 είναι αρκετά μακριά, επιλέχθηκε ως πρώτο βήμα η επίτευξη ενός πιο σταθερού αλλά εξίσου φιλόδοξου στόχου, αυτού του «20-20-20». Βάση αυτού θα επιδιωχθεί έως το έτος 2020, η μείωση κατά 20% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, η μείωση κατά 20% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας και η αύξηση στο 20% της συμμετοχής των ΑΠΕ στην παραγωγή της απαιτούμενης ενέργειας.

Ο παραπάνω σχεδιασμός και η δημιουργία ενός τέτοιου πλαισίου, οδήγησε στην αύξηση των επενδύσεων σε ΑΠΕ και την κατασκευή και λειτουργία μεγάλων μονάδων, με τις προβλέψεις να αναφέρουν αύξηση της τάξης του 30-35% του μεριδίου ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, έως το 2020. Ήδη για το 2013 η κατασκευή μονάδων ΑΠΕ αντιστοιχίσε στο 72% των νέων εγκαταστάσεων ήτοι, 25GW από τα συνολικά 35GW εγκατεστημένης νέας ισχύος, που μεταφράζεται σε αύξηση 2,85% σε σχέση με το 2012.



Σχήμα 1.1: Εξέλιξη της συνολικής παραγωγή ενέργειας ανα κατηγορία στην Ε.Ε. 2008-2018.

## 1.2 Αιολική Ενέργεια

Τα τελευταία χρόνια, η ανάγκη για μείωση των περιβαλλοντικών ρύπων από τη μία και η σταδιακή εξάντληση των ορυκτών καυσίμων από την άλλη, έχει οδηγήσει στη ραγδαία εξάπλωση και ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Μια από τις σπουδαιότερες εναλλακτικές μορφές ενέργειας, η οποία έχει διεισδύσει στα περισσότερα σύγχρονα συστήματα, φτάνοντας σε ποσοστά μέχρι και το 40% της συνολικής ζήτησης φορτίου (π.χ. Δανία), είναι η αιολική ενέργεια.

Η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας πραγματοποιείται από τα αιολικά πάρκα. Αυτά αποτελούνται από συστοιχίες ανεμογεννητριών που συνδέονται μεταξύ τους με ένα δίκτυο ΜΤ. Οι ανεμογεννήτριες (Α/Γ) μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική. Η παραγόμενη ισχύς εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα του ανέμου και είναι κατά προσέγγιση ανάλογη του κύβου της ταχύτητας. Αιολικά πάρκα με εγκατεστημένη ισχύ πάνω από 15MW συνδέονται συνήθως σε υποσταθμούς ΥΤ/ΜΤ μέσω αποκλειστικών γραμμών διανομής μέσης τάσης.

Πολλές φορές, τα αιολικά πάρκα εγκαθίστανται για ενεργειακή υποστήριξη σε αυτόνομα δίκτυα που περιλαμβάνουν ντιζελοηλεκτρικούς σταθμούς με υψηλό κόστος καυσίμου, ενώ σε σπανιότερες περιπτώσεις είναι υπεύθυνα για την αποκλειστική τροφοδότηση απομονωμένων περιοχών.

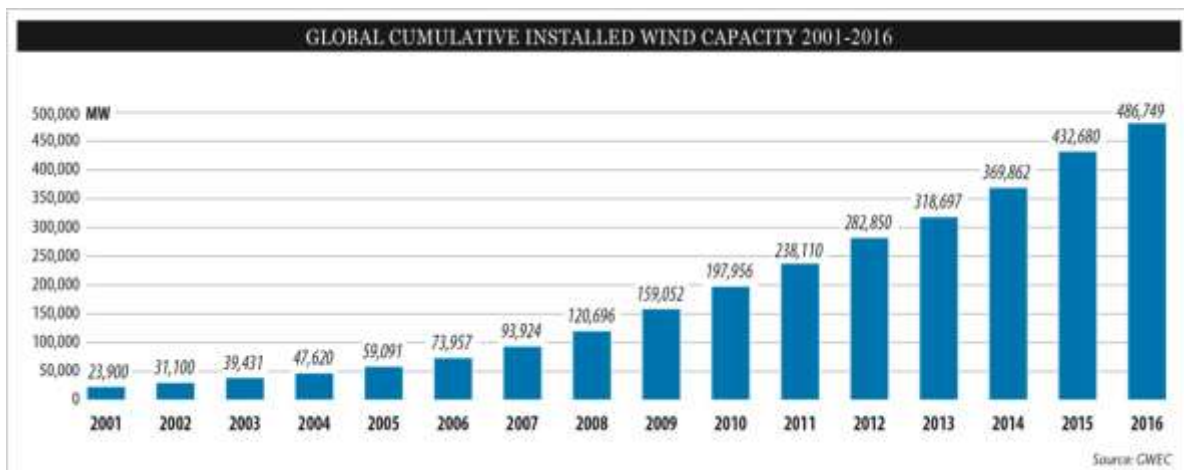
Στην Ελλάδα, παρά το γεγονός ότι υπάρχει υψηλό αιολικό δυναμικό, η πραγματική διείσδυση αιολικής ενέργειας δεν είναι ανάλογα σημαντική. Σύμφωνα με στοιχεία της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας (ΡΑΕ), το 2008 μόνο το 3,7% της συνολικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας καλύφθηκε από την αιολική παραγωγή. Μέχρι το 2013, στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα είχαν εγκατασταθεί ανεμογεννήτριες ισχύος 1495MW, όταν η συνολική



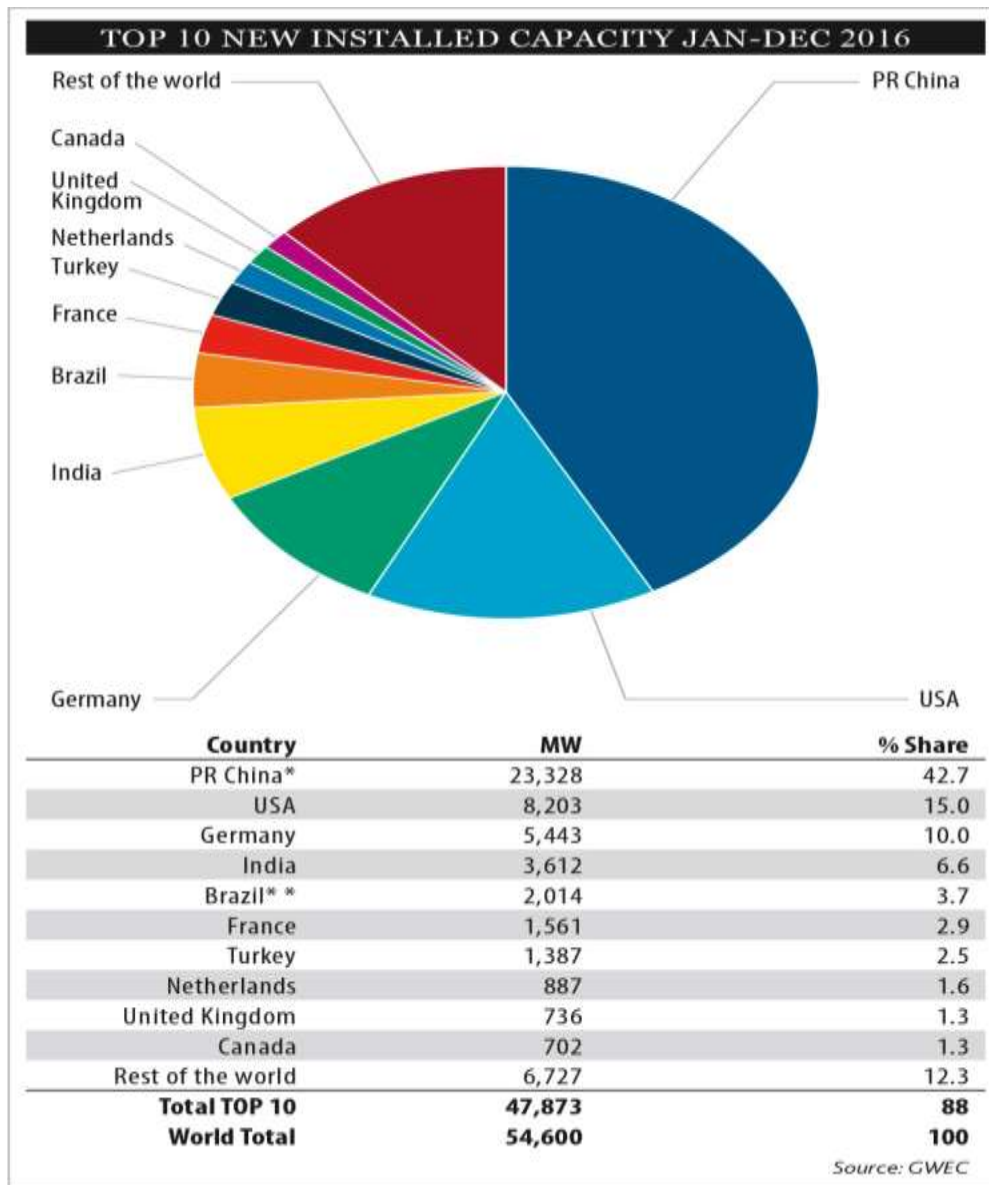
εγκατεστημένη ισχύς ήταν περίπου 17,4GW. Ενώ με τα τελευταία στατιστικά στοιχεία η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ως και το τέλος του 2018 ήταν 2844MW με βάση την έκθεση της WindEurope.

Οι περιοχές που έχουν προσελκύσει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για εγκατάσταση αιολικής παραγωγής, με βάση τις αιτήσεις των ανεξάρτητων παραγωγών στην Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας, είναι η περιοχή της Εύβοιας, η Βοιωτία και η περιοχή της Θράκης, και συγκεκριμένα τα βουνά της Ροδόπης. Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν συγκεκριμένα σχέδια για ενίσχυση του δικτύου μεταφοράς προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι περιορισμοί και να εγκατασταθούν τα μελλοντικά αιολικά πάρκα, περιβαλλοντικοί, νομικοί και οικονομικοί λόγοι οδηγούν σε σημαντικές καθυστερήσεις. Τα μεγαλύτερα ποσοστά διείσδυσης παρατηρούνται κυρίως σε νησιωτικές περιοχές της χώρας, οι οποίες δεν είναι διασυνδεδεμένες με το ηπειρωτικό σύστημα. Για παράδειγμα στην Κρήτη, το μεγαλύτερο αυτόνομο σύστημα στην Ελλάδα, η παραγωγή Αιολικών Πάρκων καλύπτει το 20% περίπου της ετήσιας ζήτησης ενέργειας.

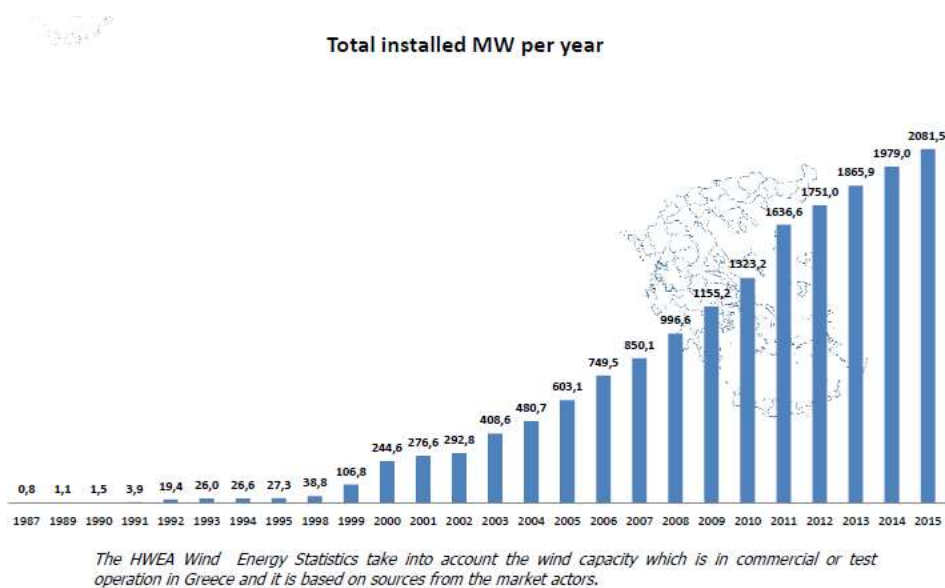
Χαρακτηριστική ιδιαιτερότητα της αιολικής ενέργειας είναι ότι δεν κατανέμεται ανάλογα με τη ζήτηση. Αυτό σημαίνει ότι το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να δέχεται, σε κάθε περίπτωση, το σύνολο της ισχύος που προσφέρουν τα αιολικά πάρκα. Για να αποφευχθεί η απόρριψη της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος σε περίπτωση πλεονάσματος, εξετάζεται η χρήση μηχανισμών αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας. Τα πρώτα χρόνια ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας, οι ανεμογεννήτριες αντιμετωπίζονταν καθαρά ως αρνητικά φορτία, καθώς το μικρό ποσοστό συμμετοχής τους στην συνολική παραγωγή δεν είχε σημαντικό αντίκτυπο στην ομαλή λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Με τον καιρό, η συνεχής αύξηση της διείσδυσης της αιολικής παραγωγής άρχισε να κάνει αισθητή της επίδραση της, όχι μόνο στη λειτουργία αλλά και στο σχεδιασμό των ΣΗΕ. Ξεκίνησε επομένως μια διαδικασία αλληλεπίδρασης μεταξύ των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, των κανονισμών για τα αιολικά πάρκα που εκδίδουν οι διαχειριστές και των κατασκευαστών ανεμογεννητριών.



Σχήμα 1.2: Εξέλιξη της εγκατεστημένης αιολικής ισχύος παγκοσμίως τα τελευταία 15 χρόνια

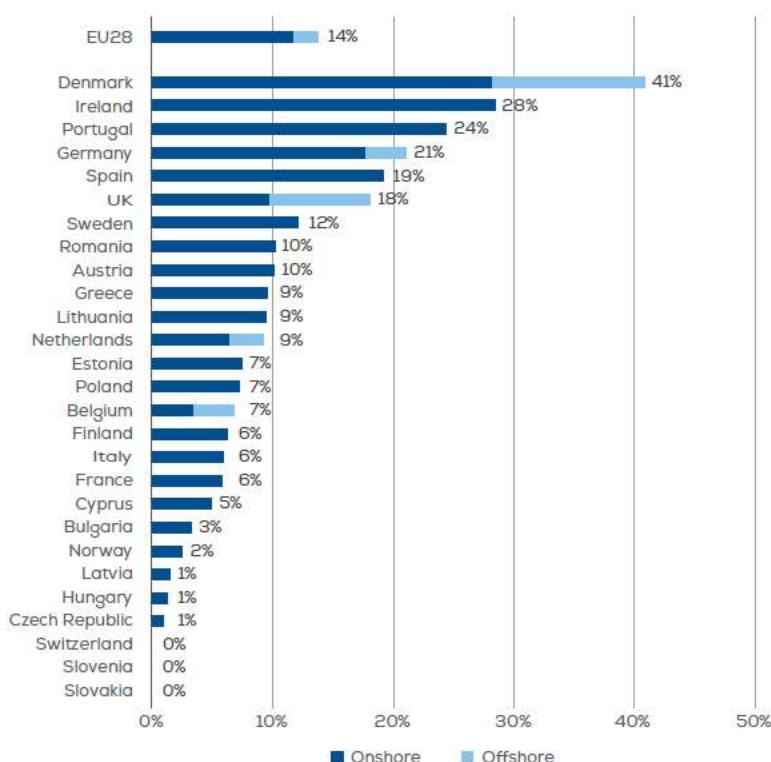


Σχήμα 1.3: Οι χώρες με το μεγαλύτερο ποσοστό εγκατεστημένης αιολικής ισχύος



Σχήμα 1.4: Εξέλιξη της εγκατεστημένης αιολικής ισχύος στην Ελλάδα τις τελευταίες δεκαετίες

Ενώ παρακάτω βλέπουμε την ανα κράτος εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας στην Ευρώπη σε onshore αλλά και σε offshore εγκαταστάσεις σε σύγκριση με την ζήτηση. Η Ελλάδα όπως βλέπουμε είναι στο 9%.



Σχήμα 1.5: Ανά κράτος ποσοστό εγκατεστημένης αιολικής ισχύος σε σχέση με τη ζήτηση

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΡΟΒΛΕΨΗ

---

### 2.1 Αξία πρόβλεψης

Η αιολική ενέργεια είναι η πιο γρήγορα αναπτυσσόμενη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Η μεταβλητότητά της, όμως, όπως θα δούμε και στα επόμενα κεφάλαια, αποτελεί εμπόδιο για την εξέλιξή της και την ενσωμάτωσή της στο δίκτυο ισχύος κατά τον ημερήσιο ενεργειακό προγραμματισμό (HEP). Για την αντιστάθμιση αυτής της μεταβλητότητας απαιτούνται εργαλεία πρόβλεψης της αιολικής ισχύος για τις επόμενες ώρες, για την διαχείριση της παραγόμενης ενέργειας είτε για την ορθότερη εκμετάλλευσή της στην εσωτερική ζήτηση της χώρας είτε για την πώλησή της προς το εξωτερικό όπως πχ. Ιταλία, Βουλγαρία. Αυτά τα λειτουργικά εργαλεία πρόβλεψης, θα πρέπει να ανταποκρίνονται στις ανάγκες των τελικών χρηστών, όπως είναι οι ανεξάρτητοι παραγωγοί ενέργειας, οι αγοραστές της ενέργειας και οι διαχειριστές του συστήματος μεταφοράς.

### 2.2 Αβεβαιότητα πρόβλεψης

Είναι γεγονός ότι καλούμαστε καθημερινά, σε διάφορες περιστάσεις, να πάρουμε αποφάσεις για διάφορα θέματα που μας απασχολούν, βασιζόμενοι σε προβλέψεις που μπορούμε να κάνουμε ανά πάσα στιγμή. Αυτές οι προβλέψεις μπορεί να αφορούν αποφάσεις μελλοντικές σε ατομικό ή συλλογικό επίπεδο. Ένα απλό παράδειγμα θα μπορούσε να είναι η ποσότητα του φαγητού που θα καταναλωθεί σε ένα τραπέζι φίλων που σκεφτόμαστε να κάνουμε για την ονομαστική μας εορτή. Η απόφαση αυτή θα μπορούσε να ληφθεί με βάση των αριθμό των ατόμων που είναι καλεσμένα με σκοπό να αγοράσουμε τόσα υλικά έτσι ώστε όλοι οι παρευρισκόμενοι να απολαύσουν ένα χορταστικό και γευστικό γεύμα.

Φυσικά αυτή η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί και σε υψηλότερο επίπεδο, όταν προβλέψεις καλούνται να κάνουν μικρές ή μεγάλες επιχειρήσεις και οργανισμοί σαν βασικό μέρος της στρατηγικής τους. Για παράδειγμα, μία εταιρία για να μπορέσει να βγάλει το πρόγραμμα παραγωγής των προϊόντων της για το επόμενο εξάμηνο, καλείται να βγάλει μία αξιόπιστη μεθοδολογία πρόβλεψης ζήτησης τέτοια ώστε να μπορεί να ικανοποιεί την εκάστοτε ζήτηση που θα υπάρχει στα προϊόντα της αλλά και να έχει διαθέσιμο απόθεμα ανά πάσα στιγμή ώστε να διαχειρίζεται τυχόν απότομες αυξήσεις στην ζήτηση των προϊόντων της, ενώ ταυτόχρονα το απόθεμα της να μην είναι τέτοιο που να αυξάνει υπερβολικά τα κόστη αποθήκευσης και συντήρησης των αγαθών.

Χωρίς αμφιβολία, το ενδιαφέρον και η σημασία της πρόβλεψης έχει αυξηθεί ραγδαία τα τελευταία 30 χρόνια. Το ενδιαφέρον αυτό προέρχεται τόσο από τον ακαδημαϊκό κόσμο όσο και από πρακτικά ασχολούμενους με την επιστήμη των προβλέψεων. Το κύριο χαρακτηριστικό που τροφοδοτεί αυτή την αύξηση ενδιαφέροντος είναι η **αβεβαιότητα**. Η πρόβλεψη έχει να κάνει με την εκτίμηση συμπεριφοράς συγκεκριμένων μεταβλητών στο

μέλλον λαμβάνοντας υπόψιν πληθώρα παραμέτρων για το σκοπό αυτό. Ακριβώς επειδή δεν ξέρουμε τι μπορεί να μας επιφυλάσσει το μέλλον, υπάρχει πάντα ο κίνδυνος «εκτροχιασμού» των προβλέψεων ακόμα και μετά από μία εμπεριστατωμένη έρευνα της εκτιμώμενης συμπεριφοράς του μέλλοντος. Η αβεβαιότητα που αποτελεί και το πιο σημαντικό «εχθρό» της επιστήμης των προβλέψεων έχει κατηγοριοποιηθεί από τον Μακρυδάκη και τους συνεργάτες του στο βιβλίο «Χορεύοντας με την Τύχη». Αναφέρουν λοιπόν δυο είδη αβεβαιότητας που συναντάμε καθημερινά:

- Η «αβεβαιότητα του μετρώ» αναφέρεται σε συνεχείς μικρές τυχαίες διακυμάνσεις τόσο της ιδιωτικής όσο και της επιχειρηματικής καθημερινότητας. Ο όρος προήλθε από την επιπλέον χρονική διάρκεια που θα χρειαστεί ένας συρμός για την διαδρομή μεταξύ δυο απομακρυσμένων σταθμών, λόγω ενός τεχνικού προβλήματος, της πολυκοσμίας ή μιας στάσης εργασίας.
- Η «αβεβαιότητα της καρύδας» αναφέρεται σε ένα εντελώς απρόσμενο και σπάνιο γεγονός που να έχει σημαντικές επιδράσεις και συνέπειες. Το όνομα αυτού του είδους η αβεβαιότητα το πήρε από το απρόσμενο γεγονός που μπορεί να συμβεί καθώς περπατάμε στο δρόμο και να πέσει στο κεφάλι μας μια καρύδα! Η «αβεβαιότητα της καρύδας» αντιπαραβάλλεται με μεγάλες φυσικές ή οικονομικές καταστροφές που είναι δύσκολο να προβλεφθεί το πότε και το που θα συντελεστούν καθώς και πόσο μεγάλες θα είναι οι επιδράσεις τους.

Ο τομέας των προβλέψεων έχει δεχθεί σφοδρές κριτικές και είχε να αντιμετωπίσει τη μεγάλη δυσaréσκεια σχετικά με την ανικανότητα των μεθόδων να προειδοποιήσουν έγκαιρα για επερχόμενες αλλαγές καθώς και για τα μεγάλα σφάλματα στις προβλέψεις. Συγχρόνως όμως, λανθασμένες ενέργειες οι οποίες προκαλούνται από ασταθή περιβάλλοντα, μη αναμενόμενες εξελίξεις, ασυνέχειες και άλλα αυξάνουν την ανάγκη για πραγματοποίηση προβλέψεων. Όταν δεν υπάρχει αβεβαιότητα στο περιβάλλον και τα πάντα κυλούν ομαλά και ακολουθούν την αναμενόμενη πορεία τους, δεν υπάρχει καμία ουσιαστική ανάγκη για προβλέψεις. Η ειρωνεία έγκειται στο γεγονός ότι σε περιόδους που η ικανότητα πρόβλεψης είναι αισθητά μειωμένη (περίοδοι που χαρακτηρίζονται από συνεχείς και απότομες μεταβολές) η ζήτηση και η ανάγκη για προβλέψεις παρουσιάζει κατακόρυφη αύξηση. Πρακτικά το παραπάνω γεγονός επιβεβαιώνεται σε περιόδους οικονομικών και άλλων κρίσεων κατά την διάρκεια των οποίων η αναζητήσεις για συμβούλους προβλέψεων αυξάνεται.

Η βασική αιτία των δυσμενών κριτικών προέρχεται από τις αυξημένες προσδοκίες των ίδιων των χρηστών του. Η πρόβλεψη δεν αποτελεί κάποια μυστική μέθοδος γνώσης του μέλλοντος και άρα η ύπαρξη σφαλμάτων στις προβλέψεις είναι αναπόφευκτη. Αυτό που πραγματικά έχει σημασία είναι να εκτιμώνται όσο πιο ρεαλιστικά γίνεται τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί των διαφόρων μεθόδων πρόβλεψης και να λαμβάνονται όλα αυτά υπόψη όταν χρησιμοποιούνται οι προβλέψεις σε διαδικασίες σχεδιασμού και λήψης αποφάσεων. Αυτή είναι άλλωστε και η νοοτροπία που ακολουθήθηκε σε αυτήν εδώ την διπλωματική. Όπως θα φανεί και παρακάτω, τέλειες προβλέψεις δεν υπάρχουν, μπορούμε όμως μελετώντας σωστά τα δεδομένα και τις μεθόδους που έχουμε στην διάθεση μας να προσομοιώσουμε όσο το δυνατόν βέλτιστα την αληθινή συμπεριφορά των υπό μελέτη μεταβλητών.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**

---

### **3.1 Γενικά**

Καθώς η ποσότητα της αιολικής ενέργειας σε μερικές χώρες έχει φτάσει σε αρκετά υψηλά επίπεδα, ιδιαιτέρως στην Ευρώπη, έχει υπάρξει μια συνεχής βελτίωση των μοντέλων πρόβλεψης αιολικής παραγωγής τα τελευταία 15 χρόνια. Έχει προκύψει ένας αριθμός παρόχων προβλέψεων αιολικής ενέργειας, με αποτέλεσμα να υπάρχει ανταγωνισμός για την παροχή των καλύτερων εκτιμήσεων στον κλάδο της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχουν αρκετές διαφορετικές ομάδες χρηστών πρόβλεψης στον κλάδο, συμπεριλαμβανομένων και εταιριών παραγωγής και βοηθητικών προγραμμάτων, αναλυτών της αγοράς και εμπόρων, καθώς και φορέων της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως, το κεφάλαιο αυτό θα εστιάσει κυρίως στην χρησιμότητα των προβλέψεων αιολικής παραγωγής στην αγορά αιολικής ενέργειας. Προκειμένου όμως να γίνει αυτό χρειάζεται μια αναδρομή στα βασικά στοιχεία της πρόβλεψης αιολικής παραγωγής, δηλαδή τους παράγοντες που επηρεάζουν την αιολική παραγωγή, παράγοντες που επιδρούν στην πρόβλεψη, όπως επίσης και τα είδη των σφαλμάτων που μπορούν να υπάρξουν σε μια πρόβλεψη.

### **3.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την αιολική παραγωγή**

Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την αιολική παραγωγή είναι πάρα πολλοί. Χαρακτηρίζονται βάση διάφορων χαρακτηριστικών όπως είναι τα χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας (πίεση, θερμοκρασία, συννεφιά, βροχόπτωση, υγρασία, πυκνότητα, ακτινοβολία, δίνες), χαρακτηριστικά τοπογραφίας (θέση ανεμογεννήτριας, μέγεθος, ύψος πύργου, υψόμετρο), χαρακτηριστικά ανέμου (ταχύτητα, διεύθυνση, ιστορικότητα, πυκνότητα αέρα) καθώς και άλλα χαρακτηριστικά όπως η στοχαστική αβεβαιότητα, η συμπεριφορά αλλά και οι γεωγραφικές συνθήκες του σημείου. Οι βασικότεροι παράγοντες εκ των οποίων και θα αναλύσουμε παρακάτω, είναι τρεις, η ταχύτητα ανέμου, η κατεύθυνση του ανέμου καθώς και η πυκνότητα αέρα. Με βάση αυτά τα 3 χαρακτηριστικά όλες οι ομάδες εργασίας μπορούν να παρέχουν στοιχεία για την αιολική παραγωγή μιας ανεμογεννήτριας. Επιπλέον, άλλα στοιχεία που μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά το αποτέλεσμα της παραγωγής είναι η μορφολογία του εδάφους καθώς μπορεί να χαλάσει τη πυκνότητα του αέρα που «βλέπει» η ανεμογεννήτρια αλλά και η διάταξη τοποθέτησης αυτών αφού μπορεί να υπάρχουν «σκιάσεις». Τα δύο τελευταία στοιχεία δεν θα ληφθούν περαιτέρω υπόψη στη συγκεκριμένη εργασία για απλούστευση των αναλύσεων.

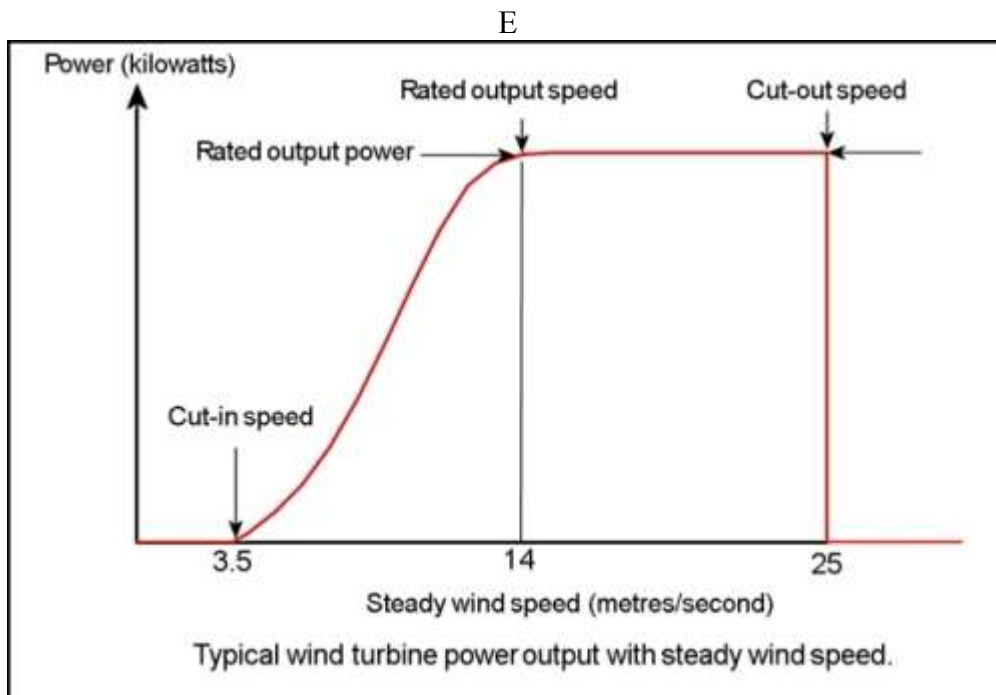
#### **3.2.1 Ταχύτητα**

Ο πιο σημαντικός παράγοντας είναι η ταχύτητα ανέμου. Με τον όρο ταχύτητα του ανέμου εννοούμε το μέτρο της συνισταμένης που προκύπτει από τις δύο κάθετες συνιστώσες του ανέμου, όπως αυτές μας δίνονται από τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού, οι οποίες θα



αναλυθούν σε επόμενο κεφάλαιο. Είναι εύκολα αντιληπτό ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ανέμου τόσο μεγαλύτερη είναι και η παραγωγή (υποθέτοντας ότι όλες οι άλλες μεταβλητές παραμένουν σταθερές).

Πρέπει να σημειωθεί πως οι ταχύτητες αέρα όπου λειτουργεί μια ανεμογεννήτρια είναι τα 3,5-25m/s. Τα 3,5 m/s χαρακτηρίζονται ως ταχύτητα ένταξης (cut-in), ενώ τα 25m/s χαρακτηρίζονται ως ταχύτητα αποκοπής (cut-off) και πάνω από αυτή τη ταχύτητα ανέμου η ανεμογεννήτρια παύει να λειτουργεί. Συνεπώς βλέπουμε πως η ωφέλιμη ταχύτητα ανέμου για μια ανεμογεννήτρια είναι τα 3,5 – 25 m/s, ενώ αν παρατηρήσουμε καλύτερα την καμπύλη ισχύος (power curve) μιας τυπικής ανεμογεννήτριας όπως βλέπουμε και στο παρακάτω σχήμα η ανεμογεννήτρια φτάνει στην μέγιστη της απόδοση πάνω από τα ~14m/s. Άρα η βέλτιστη παραγωγή επιτυγχάνεται στα 14 – 25 m/s αέρα.



Σχήμα 3.1: Καμπύλη ισχύος μια τυπικής ανεμογεννήτριας

### 3.2.2 Κατεύθυνση

Ο επόμενος παράγοντας ο οποίος επηρεάζει την αιολική παραγωγή είναι η κατεύθυνση του ανέμου η οποία ορίζεται ως η γωνία μεταξύ των δύο συνιστωσών του ανέμου και μπορεί να πάρει όλο το εύρος τιμών από 0 έως 360. Η επίδραση της κατεύθυνσης δεν είναι φυσικά τόσο μεγάλη όσο αυτή της ταχύτητας, αλλά διαδραματίζει κι αυτή σημαντικό ρόλο στην παραγωγή και κατ' επέκταση και στην πρόβλεψη, εφόσον η παραγωγή των ανεμογεννητριών διαφοροποιείται ανάλογα με την γωνία που σχηματίζουν με τον άνεμο. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί πως βόριες κατευθύνσεις ανέμου χαρακτηρίζονται πιο στρωτές με συνέπεια ο αέρας να έρχεται ομαλότερα στα φτερά της ανεμογεννήτριας και να λειτουργεί με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο σε σύγκριση με τις νότιες κατευθύνσεις ανέμων όπου εκεί

παρατηρούνται πολλοί στροβιλισμοί (turbulences) με αποτέλεσμα ο άνεμος να χτυπάει με ακανόνιστο τρόπο την ανεμογεννήτρια.

### 3.2.3 Πυκνότητα αέρα

Ένα χαρακτηριστικό το οποίο έχει επίσης σημαντική συμβολή στην παραγωγή αιολικής ενέργειας είναι και η πυκνότητα του αέρα. Η ενέργεια η οποία είναι διαθέσιμη στον άνεμο είναι ευθέως ανάλογη με την πυκνότητα του αέρα. Καθώς η πυκνότητα του αέρα αυξάνει η διαθέσιμη ενέργεια αυξάνει κι αυτή. Σ' αυτό το σημείο υπεισέρχονται και οι δύο παράγοντες που επηρεάζουν την πυκνότητα του αέρα: η πίεση του αέρα και η θερμοκρασία. Η πυκνότητα του αέρα αυξάνει με την αύξηση της πίεσης καθώς επίσης και με την πτώση της θερμοκρασίας. Και οι δύο αυτοί παράγοντες μειώνονται καθώς αυξάνεται το υψόμετρο. Κατά συνέπεια γίνεται αντιληπτό ότι προκειμένου να υπολογιστεί η παραγωγή της αιολικής ενέργειας πρέπει να ληφθούν υπόψη τόσο η θερμοκρασία όσο και η πίεση του αέρα ούτως ώστε να υπάρξει αξιοπιστία στην πρόβλεψη.

## 3.3 Χρησιμότητα πρόβλεψης αιολικής παραγωγής

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να υπάρχει πρόβλεψη της αιολικής ενέργειας ώστε να διευκολύνεται η ενσωμάτωση της στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι ιδιαίτερα σημαντική η πρόβλεψη ειδικά σε ένα σύστημα με λίγες μονάδες παραγωγής εκκίνησης που είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στις μεταβολές της ηλεκτρικής ενέργειας και στηρίζεται σε μεγάλο ποσοστό από αργές μονάδες παραγωγής. Χρήσιμες είναι και οι πληροφορίες που λαμβάνονται κατά την πρόβλεψη παραγωγής αφού λαμβάνονται ιδιαίτερα υπόψη καιρικά δεδομένα ώστε στη συνέχεια αυτά να χρησιμοποιηθούν στον προγραμματισμό μιας συντήρησης η οποία είναι ιδιαίτερος σημαντική, ειδικά όταν η αξία αυτών των μηχανών φτάνει σε επίπεδα εκατομμυρίων ευρώ. Ιδιαίτερο θέμα το οποίο πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η κατανομή των αιολικών πάρκων μέσα στο συνολικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό γιατί σε ένα μεγάλο τοπικό σύστημα με πολλές μονάδες αιολικής ενέργειας το σφάλμα είναι μικρότερο καθώς αλληλοαναιρούνται μεταξύ τους σε αντίθεση με ένα νησιωτικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας όπου η παραγωγή όλων των διαφορετικών μονάδων που υφίστανται σχετίζονται ιδιαίτερα μεταξύ τους. Τέλος, μετά και την εφαρμογή του Target – model από την Ευρωπαϊκή Ένωση, και με την επικείμενη έναρξη του χρηματιστηρίου ενέργειας, η σωστή πρόβλεψη παραγωγής μπορεί να μεταφραστεί και σε μεγάλα έσοδα κατά τη διάρκεια των αγορών/δημοπρασιών που θα υπάρξουν (ενδοημερήσια αγορά [intraday market], αγορά την επόμενη μέρας [day-ahead market] και αγορά εξισορρόπησης [balancing market]) και θα αναλυθούν σε επόμενο κεφάλαιο.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ ΚΑΙΡΟΥ**

---

### **4.1 Εισαγωγή**

Οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού (Numerical Weather Predictions-NWP) χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη των καιρικών συνθηκών χρησιμοποιώντας ατμοσφαιρικά μοντέλα και υπολογιστικές τεχνικές. Η παραγωγή αιολικής ισχύος σχετίζεται άμεσα άλλωστε με τις καιρικές συνθήκες και για το λόγο αυτό, το πρώτο βήμα για την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος είναι η πρόβλεψη των μελλοντικών τιμών των καιρικών μεταβλητών στο επίπεδο του αιολικού πάρκου.

Η ιστορία της αριθμητικής πρόγνωσης του καιρού άρχισε από το 1920 με τις προσπάθειες του Lewis Fry Richardson, ο οποίος χρησιμοποίησε διαδικασίες που αρχικά αναπτύχθηκαν από τον Vilhelm Bjerknes για να παράγει χειρωνακτικά μια εξάωρη πρόβλεψη για την κατάσταση της ατμόσφαιρας πάνω από δύο σημεία στην Κεντρική Ευρώπη, δαπανώντας τουλάχιστον έξι εβδομάδες για να το πράξει. Μόλις με την εμφάνιση των ηλεκτρονικών υπολογιστών και των προσομοιώσεων μέσω υπολογιστών, μειώθηκε ο χρόνος υπολογισμού σε λιγότερο από την ίδια περίοδο πρόβλεψης. Ο ENIAC χρησιμοποιήθηκε για την πρώτη πρόγνωση καιρού μέσω υπολογιστή το 1950. Το 1954, η ομάδα του Carl Gustav-Rossby στο Σουηδικό Μετεωρολογικό και Υδρολογικό Ινστιτούτο χρησιμοποίησε το ίδιο μοντέλο για να παράγει την πρώτη λειτουργική πρόβλεψη (δηλαδή προβλέψεις ρουτίνας για πρακτική χρήση). Η λειτουργική αριθμητική πρόγνωση του καιρού στις Ηνωμένες Πολιτείες ξεκίνησε το 1955 στο πλαίσιο της κοινής Αριθμητικής Μονάδας Πρόγνωσης Καιρού (JNWPU), ένα κοινό πρόγραμμα από την Πολεμική Αεροπορία των Η.Π.Α., του Ναυτικού και της Μετεωρολογικής Υπηρεσίας. Το 1956, ο Norman Phillips ανέπτυξε ένα μαθηματικό μοντέλο που θα μπορούσε να απεικονίζει ρεαλιστικά μηνιαίες και εποχιακές τάσεις στην τροπόσφαιρα. Αυτό έγινε το πρώτο επιτυχημένο κλιματικό μοντέλο. Ακολουθώντας την εργασία του Phillips, πολλές ομάδες άρχισαν να εργάζονται για να δημιουργήσουν μοντέλα γενικής κυκλοφορίας. Το πρώτο κλιματικό μοντέλο γενικής κυκλοφορίας, που συνδύαζε τις ωκεάνιες και ατμοσφαιρικές αλλαγές αναπτύχθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1960 στο NOAA Εργαστήριο Γεωφυσικής Fluid Dynamics.

Καθώς οι υπολογιστές έχουν γίνει πιο ισχυροί, το μέγεθος των αρχικών συνόλων δεδομένων έχει αυξηθεί και νεότερα ατμοσφαιρικά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί για να επωφεληθούν από την συνεχώς αυξανόμενη υπολογιστική ισχύ. Αυτά τα νεότερα μοντέλα περιλαμβάνουν περισσότερες φυσικές διεργασίες στις απλουστεύσεις των εξισώσεων της κίνησης σε αριθμητικές προσομοιώσεις της ατμόσφαιρας. Το 1966, η Δυτική Γερμανία και οι Ηνωμένες Πολιτείες άρχισαν να παράγουν επιχειρησιακές προβλέψεις βασιζόμενες σε μοντέλα εξισώσεων πρώτου βαθμού και ακολούθησαν το Ηνωμένο Βασίλειο το 1972 και η Αυστραλία το 1977. Η ανάπτυξη μοντέλων περιορισμένων περιοχών (περιφερειακών) διευκόλυνε την πρόβλεψη της πορείας των τροπικών κυκλώνων καθώς και την ποιότητα του αέρα στις δεκαετίες του 1970 και του 1980. Από τις αρχές της δεκαετίας του 1980 τα μοντέλα άρχισαν να περιλαμβάνουν τις αλληλεπιδράσεις του εδάφους και της βλάστησης με την ατμόσφαιρα, η οποία οδήγησε σε πιο ρεαλιστικές προβλέψεις.

Η παραγωγή των μοντέλων πρόβλεψης με βάση δυναμικής της ατμόσφαιρας δεν είναι σε θέση να επιλύσει κάποιες λεπτομέρειες που αφορούν τις καιρικές συνθήκες κοντά στην επιφάνεια της Γης. Ως εκ τούτου, μια στατιστική σχέση μεταξύ των συμπερασμάτων ενός αριθμητικού μοντέλου καιρού και τις επακόλουθες συνθήκες στο έδαφος αναπτύχθηκε στη δεκαετία του 1970 και του 1980, που είναι γνωστή ως στατιστικά αποτελέσματα του μοντέλου (MOS). Με αφετηρία το 1990, το σύνολο των μοντέλων πρόβλεψης έχει χρησιμοποιηθεί για να βοηθήσει στον καθορισμό της αβεβαιότητας της πρόβλεψης και να επεκτείνει το χρονικό ορίζοντα στον οποίο η αριθμητική πρόγνωση του καιρού είναι βιώσιμη βαθύτερα στο μέλλον από ό,τι άλλο είναι δυνατό.

Σύμφωνα με τα όσα ειπώθηκαν έως τώρα, ο ρόλος των μοντέλων των αριθμητικών προβλέψεων καιρού είναι η πρόβλεψη των μελλοντικών τιμών των καιρικών μεταβλητών. Για την πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής έχει ιδιαίτερη αξία η όσο το δυνατόν ακριβέστερη πρόβλεψη των μελλοντικών τιμών των καιρικών αυτών μεταβλητών στο επίπεδο του αιολικού πάρκου, είτε σε επίπεδο ανεμογεννητριών είτε ως ένα ενιαίο σημείο. Έτσι, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού είναι δεδομένα εισόδου για τα μοντέλα πρόβλεψης αιολικής ισχύος.

Η ανάπτυξη των αριθμητικών προβλέψεων καιρού καθίσταται δυνατή και υποστηρίζεται από τη γνώση μας για την ατμόσφαιρα. Η ατμόσφαιρα είναι ένα ρευστό. Ως εκ τούτου, η ιδέα της αριθμητικής πρόγνωσης του καιρού είναι να δοκιμαστεί η κατάσταση του ρευστού σε μια δεδομένη χρονική στιγμή και να χρησιμοποιηθούν οι εξισώσεις της ρευστοδυναμικής και θερμοδυναμικής για να εκτιμηθεί η κατάσταση του ρευστού σε κάποια χρονική στιγμή στο μέλλον. Η διαδικασία της εισαγωγής των δεδομένων της παρατήρησης μέσα στο μοντέλο για να δημιουργηθούν οι αρχικές συνθήκες ονομάζεται εκκίνηση. Στην ξηρά, διαθέσιμοι χάρτες εδάφους με αναλύσεις κάτω από 1 χιλιόμετρο σε παγκόσμιο επίπεδο χρησιμοποιούνται για να βοηθήσουν τη μοντελοποίηση της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας μέσα σε περιοχές με τραχιά τοπογραφία, προκειμένου να απεικονίζουν καλύτερα χαρακτηριστικά, όπως τους καθοδικούς ανέμους, τα κύματα των βουνών και τη σχετική νέφωση που επηρεάζει την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία. Τα κύρια εισερχόμενα από τους μετεωρολογικούς σταθμούς της υπαίθρου είναι παρατηρήσεις από συσκευές (που ονομάζεται ραδιοβολίδες ) σε μετεωρολογικά μπαλόνια που μετρούν ποικίλες ατμοσφαιρικές παραμέτρους και τις μεταδίδουν σε ένα σταθερό δέκτη, καθώς και από μετεωρολογικούς δορυφόρους. Ο Παγκόσμιος Μετεωρολογικός Οργανισμός ενεργεί για την τυποποίηση των οργάνων, παρατηρώντας τις πρακτικές και το χρονοδιάγραμμα αυτών των παρατηρήσεων σε όλο τον κόσμο. Οι σταθμοί είτε αναφέρουν ωριαία METAR εκθέσεις, ή κάθε έξι ώρες SYNOP εκθέσεις. Αυτές οι παρατηρήσεις είναι ασυνήθιστα ευρύχωρες, έτσι λοιπόν υποβάλλονται σε επεξεργασία με δεδομένα αφομοίωσης και μεθόδους αντικειμενικής ανάλυσης, οι οποίες εκτελούν έλεγχο ποιότητας και αποκτούν χρησιμότητα σε περιοχές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από μοντέλα μαθηματικών αλγορίθμων. Μερικά παγκόσμια μοντέλα χρησιμοποιούν πεπερασμένες διαφορές, κατά τις οποίες ο κόσμος αναπαρίσταται ως διακριτά σημεία πάνω σε ένα πλέγμα γεωγραφικού πλάτους και μήκους ανά τακτά διαστήματα. Άλλα μοντέλα χρησιμοποιούν φασματικές μεθόδους που αναλύονται σε μια ευρεία κλίμακα μηκών κύματος. Τα δεδομένα στη συνέχεια χρησιμοποιούνται στο μοντέλο ως το σημείο εκκίνησης για μια πρόβλεψη.

Μια ποικιλία μεθόδων χρησιμοποιείται για τη συλλογή δεδομένων παρατήρησης για χρήση σε αριθμητικά μοντέλα. Περιοχές εκτοξεύουν ραδιοβολίδες σε μετεωρολογικά μπαλόνια τα οποία ανυψώνονται μέσω της τροπόσφαιρας και κυλούν στη στρατόσφαιρα. Οι πληροφορίες από μετεωρολογικούς δορυφόρους χρησιμοποιούνται εκεί όπου δεν είναι διαθέσιμες παραδοσιακές πηγές δεδομένων. Το εμπόριο παρέχει αναφορές των πιλότων σε όλη τη διάρκεια της διαδρομής των αεροσκαφών και των πλοιάρχων για όλη τη διάρκεια των διαδρομών των πλοίων. Τα ερευνητικά προγράμματα χρησιμοποιούν αναγνωριστικά αεροσκάφη τα οποία πετούν μέσα και γύρω από τα καιρικά συστήματα που παρουσιάζουν ενδιαφέρον, όπως οι τροπικοί κυκλώνες. Τα αναγνωριστικά αεροσκάφη επίσης πετούν πάνω από τους ανοικτούς ωκεανούς κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου, μέσα σε συστήματα που προκαλούν σημαντικές αβεβαιότητες στην καθοδήγηση της πρόβλεψης ή είναι απρόσμενο να έχουν υψηλά αποτελέσματα από τρεις έως επτά ημέρες στο μέλλον πάνω από κάποια ήπειρο. Ο θαλάσσιος πάγος άρχισε να εισάγεται στα μοντέλα πρόβλεψης το 1971. Οι προσπάθειες για τη συμμετοχή επιφανειακής θερμοκρασίας της θάλασσας στην εκκίνηση του μοντέλου άρχισε το 1972, λόγω του ρόλου της στη διαμόρφωση των καιρικών συνθηκών σε υψηλότερα γεωγραφικά πλάτη του Ειρηνικού.

Ένα μοντέλο αριθμητικής πρόβλεψης είναι ένα πρόγραμμα υπολογιστή που παράγει μετεωρολογικές πληροφορίες για μελλοντικές εποχές σε δεδομένες τοποθεσίες και γεωγραφικά πλάτη. Εντός κάθε σύγχρονου μοντέλου υπάρχει ένα σύνολο εξισώσεων, γνωστό ως εξισώσεις πρώτου βαθμού, που χρησιμοποιούνται για να προβλέψουν τη μελλοντική κατάσταση της ατμόσφαιρας. Αυτές οι εξισώσεις μαζί με τον ιδανικό νόμο των αερίων χρησιμοποιούνται για να εξαχθεί η πυκνότητα, η πίεση, τα δυναμικά πεδία της θερμοκρασίας και το διανυσματικό πεδίο της ταχύτητας του αέρα της ατμόσφαιρας, μέσα στο χρόνο. Επιπλέον εξισώσεις μεταφοράς ρύπων και άλλα αερολύματα περιλαμβάνονται σε ορισμένες πρώτου βαθμού εξισώσεις μοντέλων υψηλής ανάλυσης επίσης. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις οι οποίες είναι αδύνατο να λυθούν ακριβώς με αναλυτικές μεθόδους, με εξαίρεση λίγες εξιδανικευμένες περιπτώσεις. Επομένως, οι αριθμητικές μέθοδοι επιδέχονται κατά προσέγγιση λύσεις. Διαφορετικά μοντέλα χρησιμοποιούν διαφορετικές μεθόδους λύσης: ορισμένα παγκόσμια μοντέλα και σχεδόν όλα τα τοπικά μοντέλα χρησιμοποιούν μεθόδους πεπερασμένων διαφορών και για τις τρεις διαστάσεις του χώρου, ενώ άλλα παγκόσμια μοντέλα και μερικά τοπικά μοντέλα χρησιμοποιούν φασματικές μεθόδους για τις οριζόντιες διαστάσεις και μεθόδους πεπερασμένων διαφορών για τις κάθετες. Αυτές οι εξισώσεις εισάγονται από τα δεδομένα της ανάλυσης και προσδιορίζονται οι ρυθμοί μεταβολής. Αυτά τα ποσοστά μεταβολής προβλέπουν την κατάσταση της ατμόσφαιρας σε σύντομο χρονικό διάστημα στο μέλλον. Η αύξηση του χρόνου για την πρόβλεψη αυτή ονομάζεται χρονικό βήμα. Οι εξισώσεις τότε εφαρμόζονται σε αυτή τη νέα ατμοσφαιρική κατάσταση για να βρουν νέους ρυθμούς μεταβολής, και αυτά τα νέα ποσοστά μεταβολής προβλέπουν την ατμόσφαιρα σε ένα περαιτέρω χρονικό βήμα στο μέλλον. Αυτή η αναβάθμιση του χρόνου επαναλαμβάνεται έως ότου η λύση φτάσει στην επιθυμητή ώρα πρόβλεψης. Το μέγεθος του χρονικού διαστήματος που επιλέγεται εντός του μοντέλου σχετίζεται με την απόσταση μεταξύ των σημείων για το υπολογιστικό πλέγμα, και επιλέγεται για να διατηρηθεί η αριθμητική σταθερότητα. Τα χρονικά διαστήματα για τα παγκόσμια μοντέλα είναι της τάξης των δεκάδων λεπτών, ενώ τα χρονικά διαστήματα για τα τοπικά μοντέλα είναι μεταξύ ενός και τεσσάρων λεπτών. Τα

παγκόσμια μοντέλα τρέχουν σε διάφορες χρονικές στιγμές στο μέλλον. Το ενοποιημένο μοντέλο UKMET λειτουργεί για έξι ημέρες στο μέλλον, ενώ το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Μετεωρολογικών Προγνώσεων και το μοντέλο Ολοκληρωμένου Συστήματος πρόγνωσης Περιβάλλοντος του Καναδά, Global Environmental Multiscale, τρέχουν για δέκα ημέρες στο μέλλον. Παράλληλα, το Παγκόσμιο Σύστημα Πρόγνωσης, που διευθύνεται από το Κέντρο Περιβαλλοντικής Μοντελοποίησης λειτουργεί με χρονικό ορίζοντα δεκαέξι ημερών. Το οπτικό αποτέλεσμα που παράγεται από μια λύση μοντέλου είναι γνωστό ως προγνωστικός χάρτης.

Κάνοντας χειρισμούς στον τεράστιο αριθμό δεδομένων και εκτελώντας πολύπλοκους υπολογισμούς που είναι απαραίτητοι στη σύγχρονη αριθμητική πρόγνωση του καιρού, απαιτεί μερικούς από τους πιο ισχυρούς υπερυπολογιστές στον κόσμο. Ακόμη και με την αυξανόμενη δύναμη των υπερυπολογιστών, η ικανότητα πρόβλεψης των αριθμητικών μοντέλων καιρού εκτείνεται σε περίπου δέκα μόνο μέρες. Παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια των αριθμητικών προβλέψεων περιλαμβάνουν την πυκνότητα και την ποιότητα των παρατηρήσεων που χρησιμοποιούνται ως βάση για τις προβλέψεις, σε συνδυασμό με τις αδυναμίες των ίδιων των αριθμητικών μοντέλων. Παρόλο που έχουν αναπτυχθεί τεχνικές για μετά τη διαδικασία, όπως οι στατιστικές μοντέλου παραγωγής (MOS) για να βελτιωθεί ο χειρισμός των σφαλμάτων στις αριθμητικές προβλέψεις, ένα πιο θεμελιώδες πρόβλημα έγκειται στην χαοτική φύση των διαφορικών εξισώσεων που χρησιμοποιούνται για να προσομοιώσουν την ατμόσφαιρα. Είναι αδύνατο να λυθούν αυτές οι εξισώσεις ακριβώς, και τα μικρά λάθη μεγαλώνουν με το χρόνο (διπλασιαζόμενα περίπου κάθε πέντε ημέρες). Επιπλέον, οι διαφορικές εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο πρέπει να συμπληρωθούν με παραμέτρους για την ηλιακή ακτινοβολία, την πορεία της υγρασίας (σύννεφα και βροχοπτώσεις), της ανταλλαγή της θερμοκρασίας, το έδαφος, τη βλάστηση, τα επιφανειακά ύδατα, καθώς και τις επιπτώσεις τους στο εδάφος. Σε μια προσπάθεια να αξιολογήσουν το μεγάλο ποσό της εγγενούς αβεβαιότητας που παραμένει στις αριθμητικές προβλέψεις, ένα σύνολο προβλέψεων έχουν χρησιμοποιηθεί από τη δεκαετία του 1990, για να βοηθήσει να μετρηθεί ακριβώς η αξιοπιστία των προγνώσεων και να αποκτηθούν χρήσιμα αποτελέσματα για το απώτερο μέλλον. Η προσέγγιση αυτή αναλύει πολλαπλές προβλέψεις που δημιουργήθηκαν με ένα επιμέρους μοντέλο πρόβλεψης ή πολλαπλά μοντέλα.

## 4.2 Παγκόσμια μοντέλα και μεσοπρόθεσμες προβλέψεις

Τα παγκόσμια μοντέλα αριθμητικών προβλέψεων καιρού αποτελούν τον πυρήνα των καιρικών προβλέψεων, αφού υποστηρίζουν στο μεγαλύτερο βαθμό την διαδικασία αφομοίωσης δεδομένων και παράγουν τις αρχικές και οριακές συνθήκες, που χρησιμοποιούνται στα μοντέλα περιορισμένης περιοχής. Αυτά τα μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν ευρέως ως κύρια πηγή κλιματολογικών δεδομένων μέσω της διεξαγωγής παγκοσμίων επαν-αναλύσεων. Η επανανάλυση δεδομένων αφορά το αποτέλεσμα της αφομοίωσης δεδομένων που παράγεται από ένα σταθερό μοντέλο ενώ η λειτουργική ανάλυση παράγεται από δυναμικά μοντέλα διαφορετικού τύπου διότι τα μοντέλα ενημερώνονται συνεχώς.

### 4.3 Αφομοίωση δεδομένων για την αρχικοποίηση των μοντέλων

Κάθε μετεωρολογικό μοντέλο απαιτεί κάποιας μορφής αφομοίωση δεδομένων, προκειμένου να προσδιορίσει την αρχική του κατάσταση. Στα σύγχρονα παγκόσμια μοντέλα η αφομοίωση δεδομένων αποτελεί μία από τις κυριότερες επιτυχίες του μοντέλου, ιδιαίτερα αν αναλογιστούμε ότι τα λάθη στην αρχικοποίηση του μοντέλου αναγνωρίζονται γενικά ως ο μεγαλύτερος κίνδυνος για αβεβαιότητα των προβλέψεων που παράγει. Λαμβάνοντας μάλιστα υπόψη την τεράστια ποσότητα των διαθέσιμων για αφομοίωση δεδομένων, τα οποία προέρχονται από ραδιοβολίδες, δορυφόρους, εμπορικά αεροπλάνα, σταθμούς στην επιφάνεια της γης κ.λ.π., οι διαδικασίες αφομοίωσης δεδομένων είναι δυνατόν να διεξαχθούν μόνο σε μεγάλους μετεωρολογικούς σταθμούς που έχουν πρόσβαση στα δίκτυα διανομής πληροφοριών του Παγκόσμιου Μετεωρολογικού Οργανισμού (World Meteorological Organization - WMO) και τα τεχνολογικά εφόδια να διαχειρίζονται την τεράστια ροή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Παλαιότερα συστήματα NWP χρησιμοποιούσαν απλουστευμένους αλγόριθμους αφομοίωσης δεδομένων, οι οποίοι παρενέβαλλαν παρατηρήσεις στο πλέγμα του μοντέλου, εφαρμόζοντας ταυτόχρονα κάποια φίλτρα και περιορισμούς για την ισορροπία μεταξύ διαφορετικών πεδίων και όλα σχεδιασμένα έτσι ώστε να μειώνουν το θόρυβο στην αρχική κατάσταση. Σύγχρονοι κώδικες αφομοίωσης δεδομένων (όπως μέθοδοι 3D-VAR και 4D-VAR των *Lewis* και *Derber*) υιοθετούν μια εναλλακτική προσέγγιση για τη βελτιστοποίηση της αρχικής κατάστασης, συχνά αφομοιώνοντας παρατηρήσεις εντός ενός χρονικού διαστήματος. Η προσέγγιση αυτή είναι αρκετά κατάλληλη για τα σύγχρονα συστήματα αφομοίωσης, με δυνατότητες ανίχνευσης παρατηρήσεων από μακριά, οι οποίες ενημερώνονται τακτικά (π.χ. ανά 15 λεπτά). Οι περιορισμοί που επιβάλλονται από πιο σύγχρονα συστήματα δεδομένων ενσωματώνουν τις φυσικές ισορροπίες που συμπεριλαμβάνονται στις εξισώσεις των μοντέλων, καθώς οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούν τις προβλέψεις άλλων μοντέλων ως αρχική εκτίμηση της αρχικής τους κατάστασης.

Το δίκτυο ραδιοβόλισης ήταν για πολλές δεκαετίες η «ραχοκοκαλιά» των παρακολουθήσεων της ατμόσφαιρας, παράγοντας τις μόνες άμεσες παρατηρήσεις για την τρισδιάστατη κατάσταση αυτής. Μαζί με ένα αρκετά πιο πυκνό δίκτυο σταθμών της επιφάνειας, συναποτελούν το πρωταρχικό δίκτυο που δίνει σε παγκόσμια κλίμακα συγχρονισμένες παρατηρήσεις σε προκαθορισμένες χρονικές στιγμές. Ωστόσο το πρόβλημα με το δίκτυο αυτό είναι η μεγάλη χωρική ετερογένεια του, με μεγάλες εκτάσεις κυρίως πάνω από ωκεανούς πρακτικά να μην παρατηρούνται. Λόγω αυτών των δυσχερειών άρχισαν σταδιακά να χρησιμοποιούνται σε μεγαλύτερο βαθμό δεδομένα διαφορετικής φύσης, όπως δεδομένα από δορυφόρους, στη διαδικασία της αφομοίωσης. Οι παρατηρήσεις από δορυφόρους είναι σήμερα η κύρια πηγή δεδομένων, αν και τα παραγόμενα δεδομένα είναι μεγάλης κλίμακας υπό την έννοια ότι είναι πιο εύχρηστα για τα παγκόσμια μοντέλα και λιγότερο για τα τοπικά. Υπάρχουν ωστόσο πιθανές πηγές δεδομένων για μικρότερης κλίμακας μοντέλα, όπως εικόνες από ραντάρ κ.α. οι οποίες μπορεί σύντομα να φανούν χρήσιμες για τα τοπικής χρήσης μοντέλα αριθμητικών προβλέψεων καιρού.



## 4.4 Τυποποίηση των μοντέλων ( Model Formulation )

Η πλειοψηφία των παγκόσμιων μοντέλων αριθμητικών προβλέψεων καιρού, με αξιοσημείωτη εξαίρεση το μοντέλο UK Met Office χρησιμοποιούν μια μέθοδο φασματικής διακριτοποίησης της υδρόγειου σφαίρας ,αναπαριστώντας τα ατμοσφαιρικά πεδία ως άθροισμα σφαιρικών συνιστωσών. Ο αριθμός των όρων που συμμετέχουν στο άθροισμα αυτό καθορίζει την τάξη της προσέγγισης που σχετίζεται άμεσα με τη χωρική ανάλυση του μοντέλου .Ωστόσο επειδή πολλές από τις διαδικασίες του μοντέλου υπολογίζονται στο φυσικό και όχι στο φασματικό πεδίο, το μοντέλο υπολογίζει τους ευθείς και αντίστροφους μετασχηματισμούς σε κάθε χρονικό βήμα. Τα περισσότερα παγκόσμια μοντέλα χρησιμοποιούν μια διαμορφωμένη ανάλογα με την κατακόρυφη πίεση συντεταγμένη σε ένα σιγμοειδές κατά Phillips σύστημα που ακολουθεί την επιφάνεια της γης, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα υπολογισμού των επιφανειακών συνοριακών συνθηκών για το διάνυσμα του ανέμου. Η χρήση της πίεσης για τον καθορισμό της κατακόρυφης συνιστώσας απλοποιεί τους θερμοδυναμικούς υπολογισμούς και συναντάται συχνά στη μετεωρολογική μοντελοποίηση. Η προσέγγιση ταιριάζει πολύ στα υδροστατικά μοντέλα (πρωτογενείς εξισώσεις), ενώ είναι εφικτή και για τα μη υδροστατικά μοντέλα.

Τα παγκόσμια μοντέλα πρωτογενών εξισώσεων ενσωματώνουν προγνωστικές εξισώσεις για τις οριζόντιες συνιστώσες του ανέμου, για την επιφανειακή πίεση, για μια θερμοδυναμική μεταβλητή (θερμοκρασία ή πιθανή θερμοκρασία) και τουλάχιστον για τους υδρατμούς, αν δεν ενσωματώσουν τις υπόλοιπες «αποθήκες» νερού όπως σύννεφα νερού, πάγος κ.τ.λ. Λοιπές μεταβλητές υπολογίζονται από τη σχέση τους με τις παραπάνω , όπως για παράδειγμα η κατακόρυφη ταχύτητα του ανέμου η οποία δεν είναι δυνατόν να υπολογιστεί άμεσα σε μια υδροστατική προσέγγιση και υπολογίζεται εν τέλει μέσω της ολοκλήρωσης της εξίσωσης συνέχειας.

Τα μοντέλα διαφέρουν επί της ουσίας στις αριθμητικές μεθόδους που χρησιμοποιούν . Οι μη γραμμικοί όροι για την κίνηση των αέριων μαζών στις διάφορες προγνωστικές εξισώσεις δεν είναι επαρκείς για υπολογισμό στο φασματικό πεδίο και επιλύονται στο φυσικό πεδίο, στο οποίο τα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιήσουν διαφορετικά σχήματα διαφορικών ή ημι-λαγκρανζιανές προσεγγίσεις. Επιπλέον, η οριζόντια κίνηση αέριων μαζών είναι συχνά η δυναμική διαδικασία που καθορίζει το χρονικό βήμα του μοντέλου και είναι μια κυρίαρχη ατμοσφαιρική διαδικασία. Επομένως ως συνιστώσα του μοντέλου μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη συμπεριφορά και την απόδοσή του.

### 4.4.1 Βασικά μετεωρολογικά μοντέλα αριθμητικών προβλέψεων καιρού

Η ανάπτυξη ενός μοντέλου πρόβλεψης της αιολικής ισχύος συνεπάγεται τη χρήση της εξόδου κάποιου μετεωρολογικού μοντέλου. Για την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος, συνήθως, χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα ενός μοντέλου αριθμητικών προβλέψεων καιρού που παρέχονται από τις μετεωρολογικές υπηρεσίες της κάθε χώρας. Το πιο ευρέως διαδεδομένο μέσης κλίμακας μοντέλο είναι το MM5 ενώ το πιο γνωστό μικρής κλίμακας CFD μοντέλο είναι το WAsP. Τα μοντέλα των αριθμητικών προβλέψεων καιρού που είναι σε χρήση είναι

το HIRLAM, το SKIRON, το ALADIN και το ECMWF το οποίο θα αναλύσουμε στη συνέχεια. Στη συνέχεια πραγματοποιείται μια περιληπτική αναφορά των παραπάνω μοντέλων.

#### *WasP*

Το WASP είναι τα αρχικά του Wind Atlas Analysis and Application Program και είναι το πιο διαδεδομένο εργαλείο για την πρόβλεψη του ανέμου τόσο στην γη όσο και στη θάλασσα. Το WASP προέκυψε από την έρευνα του European Wind Atlas το 1989 από τους Troen και Petersen, με σκοπό την εξομοίωση των στατιστικών των ανέμων κοντά στη επιφάνεια σε μια περιοχή, με βάση τις παρατηρήσεις του καιρού, αλλά και τις ορογραφικές και τοπογραφικές πληροφορίες. Είναι ένα γρήγορο και φιλικό προς το χρήστη εργαλείο και από την πρώτη στιγμή που δημιουργήθηκε, επικράτησε για την εκτίμηση των τοπικών ανέμων, την εξακρίβωση των επιφανειακών ανέμων, σε περιοχές όπου επικρατούν ίδιες συνθήκες ανέμου. Το WASP είναι ένα πρόγραμμα για υπολογιστές που χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη των ανέμων αλλά και της παραγωγής αιολικής ισχύος από μια ανεμογεννήτρια ή ένα αιολικό πάρκο. Οι προβλέψεις βασίζονται σε δεδομένα για τον άνεμο που μετρήθηκαν σε σταθμούς στην ίδια περιοχή που βρίσκεται το αιολικό πάρκο. Το πρόγραμμα περιέχει ένα μοντέλο ανάλυσης της ροής του ανέμου, ένα μοντέλο για την αλλαγή της τραχύτητας και ένα μοντέλο για την τοποθέτηση διαφόρων φυσικών εμποδίων. Σε θαλάσσιες περιοχές δίνει καλές προβλέψεις σε σχέση με τον παρατηρούμενο μέσο όρο της προβλεπόμενης ταχύτητας του ανέμου αλλά και σε σχέση με τα χαρακτηριστικά του ανέμου που έχουν περιγραφεί σε αυτή την περιοχή. Στον τομέα της ανάλυσης, τα στατιστικά αποτελέσματα που προκύπτουν από ένα μεγάλο αριθμό δεδομένων για την ταχύτητα και τη διεύθυνση το ανέμου στην περιοχή που βρίσκεται το πάρκο που μας ενδιαφέρει, χρησιμοποιούνται για το σχηματισμό του οριακού στρώματος του πάρκου με τη χρήση μια κατανομής Weibull και μοντελοποιούνται ανάλογα με τις επιπτώσεις τον εμποδίων, της τραχύτητας του εδάφους και της ορογραφίας στο συγκεκριμένο πάρκο. Τα στατιστικά αποτελέσματα από την επεξεργασία αυτή για τη διεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου είναι γνωστά σαν κλίμα ανέμου (Wind Climate) και αντιπροσωπεύουν τον γεωστροφικό άνεμο στην περιοχή αυτή. Στο τομέα της εφαρμογής, η πρόβλεψη σε μια τοποθεσία που εξετάζεται η εγκατάσταση αιολικού πάρκου δημιουργείται με τη χρήση δεδομένων για το κλίμα ανέμου και μετασχηματίζοντάς τα από το οριακό στρώμα, χαμηλά στο επίπεδο που θα βρίσκεται το υποθετικό πάρκο (ακριβώς αντίθετη διαδικασία από τον τομέα της ανάλυσης που αναφέρθηκε προηγουμένως).

Το μοντέλο WASP αναπτύχθηκε κυρίως για εφαρμογές στη γη και η λειτουργικότητά του σε περιοχές πέρα από την ακτή είναι αμφισβητήσιμη και αυτό γιατί:

- Η τραχύτητα της επιφάνειας της θάλασσας εξαρτάται από το επίπεδο των κυμάτων και δεν είναι σταθερή, όπως τη θεωρείται στο WASP.
- Η διαστρωμάτωση της ατμόσφαιρας επηρεάζει τα χαρακτηριστικά του ανέμου που έχουν διαπιστωθεί στη θαλάσσια περιοχή (προφίλ ανέμου) ακόμη και για μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου. Το WASP χρησιμοποιεί ένα μέσο προφίλ που είναι ανεξάρτητο από την πραγματική θερμική κατάσταση που επικρατεί στην περιοχή.

- Η ασυνέχεια της ξηράς-θάλασσας δημιουργεί ένα εσωτερικό οριακό στρώμα (IBL-internal boundary layer) που εξαρτάται άμεσα από τη σταθερότητα της ατμόσφαιρας. Το WAsP χρησιμοποιεί και εδώ ένα μέσο οριακό στρώμα.

#### MM5

Το MM5 είναι ένα ακόμη μοντέλο αριθμητικής πρόβλεψης καιρού. Είναι ένα μοντέλο μέσης κλίμακας και δημιουργήθηκε από το Pennsylvania State University και στο National Center for Atmospheric Research με δυνατότητα προσομοίωσης ατμοσφαιρικών συνθηκών με ανάλυση από 100km μέχρι 1km. Είναι ένα μοντέλο περιορισμένης εμβέλειας, μη υδροστατικό, με λεπτομερή περιγραφή της πίεσης, της ταχύτητας και της θερμοκρασίας. Εξαρτάται άμεσα από τη συντεταγμένη του εδάφους σίγμα ( $\sigma$ ). Ο αριθμητικός υπολογισμός γίνεται πάνω σε ένα εναλλασσόμενο ορθογώνιο σύστημα με τη χρήση πεπερασμένων διαφορών. Η κάθετη συνιστώσα είναι η εξαρτημένη συντεταγμένη από το έδαφος, σίγμα ( $\sigma$ ). Σκοπός είναι να γίνεται μια πιο ρεαλιστική και αποτελεσματική προσέγγιση της τοποθεσίας όπου βρίσκεται το αιολικό πάρκο, γεγονός που θα εξασφαλίσει καλύτερη ποιότητα προβλέψεων. Για αυτό το λόγο, το φυσικό πακέτο του MM5 περιέχει όλα τα απαραίτητα δεδομένα για την παραμετροποίηση διαφόρων χαρακτηριστικών όπως το νέφος, η ακτινοβολία, το οριακό στρώμα του πλανήτη, η μικροφυσική και επιπλέον επιφανειακά εμπόδια. Ένα σχέδιο για τη συγκέντρωση δεδομένων τεσσάρων διαστάσεων περιέχεται μέσα στο μοντέλο με τη δυνατότητα να προσαρμόζει το αποτέλεσμα ανάλογα με την ανάλυση ή τις μετρήσεις που έγιναν.

#### HIRLAM

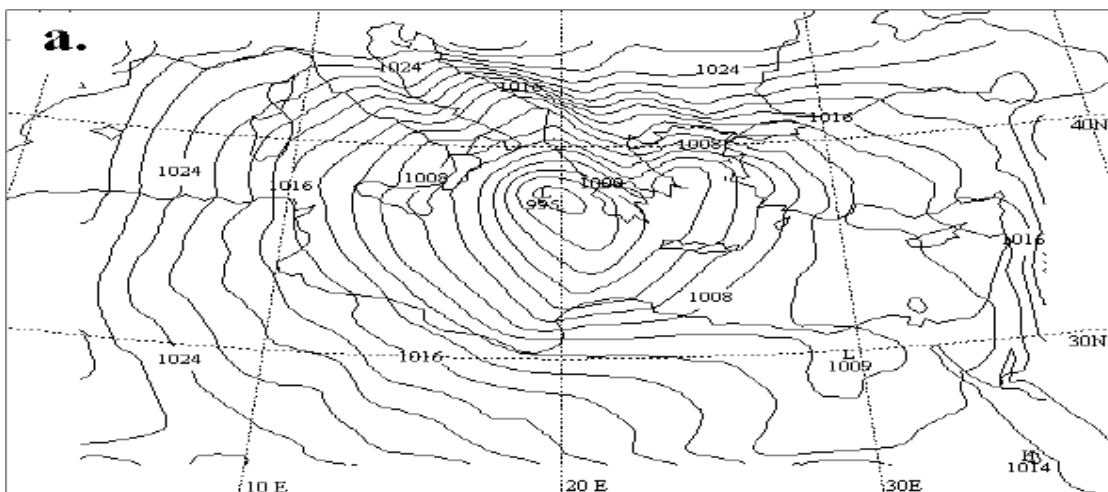
Το μοντέλο Hirlam (High Resolution Limited Area Model) είναι ένα μοντέλο πρόγνωσης του καιρού σε μικρής κλίμακας περιοχή και για μικρό ορίζοντα πρόβλεψης. Σκοπός του είναι να αναπτύξει ένα σύστημα μετεωρολογικής πρόγνωσης που να παρέχει μεγάλης ακρίβειας αριθμητικές προβλέψεις καιρού και να είναι λειτουργικό για τα μέλη του. Το μοντέλο HIRLAM είναι ένα υδροστατικό μοντέλο με οριζόντια ανάλυση πλέγματος από 55Km μέχρι 5Km και τα κάθετα επίπεδα που χρησιμοποιεί κυμαίνονται από 16 μέχρι 40, ανάλογα σε ποια μετεωρολογικά υπηρεσία εφαρμόζονται. Στο πρόγραμμα αυτό συμμετείχαν οι μετεωρολογικές υπηρεσίες των χωρών Δανίας, Φιλανδίας, Ισλανδίας, Ιρλανδίας, Ολλανδίας, Νορβηγίας, Ισπανίας και Σουηδίας, καθώς και η Meteo-France.

Το HIRLAM δίνει μεγάλο ενδιαφέρον στη χωρική ανάλυση του μοντέλου. Κάθε διαδικασία που σχετίζεται με την περιγραφή της κατάστασης της ατμόσφαιρας παρουσιάζει ιδιαίτερες δυσκολίες σε υψηλή ανάλυση. Για παράδειγμα, στην παραμετροποίηση της ατμοσφαιρικής ακτινοβολίας, μπορούν να προκύψουν καταστάσεις όπου η μετάδοση ακτινοβολίας σε γειτονικά κουτιά του πλαισίου μπορεί να συμβάλλει σε τοπικές θερμικές κινήσεις του αέρα. Τέτοια φαινόμενα παρουσιάζονται για αναλύσεις μικρότερες από 10 Km και δεν έχουν αντιμετωπιστεί πλήρως από το HIRLAM. Το HIRLAM παρέχει αναλύσεις με τη μέθοδο σημείων πλέγματος και με την φασματική μέθοδο.

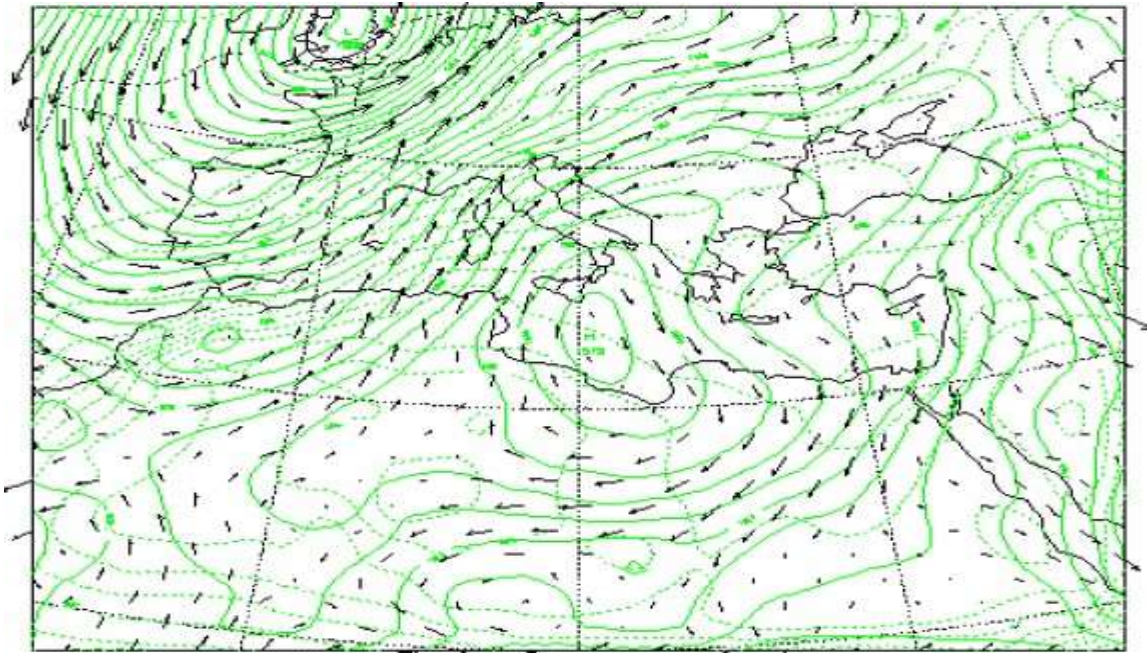


## SKIRON

Το μετεωρολογικό σύστημα SKIRON αναπτύχθηκε από στο Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο της Αθήνας με σκοπό την εφαρμογή του στην Ελληνική Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EEMY) για την τοπική πρόγνωση καιρού στην περιοχή της Μεσογείου. Είναι ένα αξιόπιστο υπολογιστικό σύστημα το οποίο παράγει προβλέψεις καιρού και είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για τοπικές ατμοσφαιρικές συνθήκες. Το SKIRON είναι η εξέλιξη του μοντέλου Eta το οποίο έχει αναπτυχθεί από το Πανεπιστήμιο του Βελιγραδίου με σκοπό την πρόγνωση του καιρού σε περιοχές με απότομες κλίσεις βουνά. Το Eta μοντέλο έχει σχεδιαστεί ως ένα υδροστατικό μοντέλο που χρησιμοποιεί στοιχειώδεις εξισώσεις βασισμένες σε υδροστατική προσέγγιση. Συνεπώς η καλύτερη οριζόντια ανάλυση που μπορεί να εκτελεστεί είναι περίπου 5-10 Km. Μέσω του ερευνητικού προγράμματος SKIRON, το μοντέλο Eta επεκτάθηκε ώστε να μπορεί να προβλέπει την παραγωγή και διασπορά της ατμοσφαιρικής σκόνης καθώς και άλλες μορφές ρύπανσης. Συνοπτικά ένα μοντέλο αναπτύχθηκε που να εκτελείται πλήρως αυτόματα και να παρέχει ένα κατάλληλο περιβάλλον για επεξεργασία δεδομένων και υπολογισμών για την εκτέλεση του μοντέλου Eta. Ο βασικός σκοπός του ερευνητικού προγράμματος ήταν η δημιουργία ενός υπολογιστικά ευέλικτου μοντέλου που να παράγει προβλέψεις ιδιαίτερα για τοπικές συνθήκες καιρού. Το σύστημα SKIRON περιέχει και ένα μοντέλο γραφικής αναπαράστασης των αποτελεσμάτων. Αυτό χρησιμοποιεί εξόδους από διάφορα εργαλεία, με τρισδιάστατες και τετραδιάστατες απεικονίσεις. Επίσης, παρέχει τα αποτελέσματά του σε μορφή *derpi* (*derpi format*). Τα μοντέλα πρόβλεψης της παραγωγής ενός αιολικού πάρκου χρησιμοποιούν τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού με τη μορφή αυτή κειμένου. Τις αρχικές και οριακές συνθήκες τις λαμβάνει από την ECMWF οι οποίες ανανεώνονται κάθε τρεις ώρες. Η συχνότητα ενημέρωσης των μετεωρολογικών προβλέψεων είναι μια φορά τη μέρα και η πρόγνωση καλύπτει τις επόμενες 72 ώρες. Το SKIRON τρέχει καθημερινά και για αυτό χρειάζονται 16 επεξεργαστές.



**Σχήμα 4.1: Προβλέψεις του SKIRON: (α) Πίεση στο επίπεδο της θάλασσας σε ισοβαρείς καμπύλες σχεδιασμένες κάθε 2 hPa στις 12 UTC 14 Ιανουαρίου 2005**



Σχήμα 4.2: Άνεμος και γεωδυναμικό 850hPa στις 12 UTC 4 Ιουλίου.2005

#### ALADIN

Το μοντέλο των αριθμητικών προβλέψεων καιρού ALADIN (Limited Area, dynamical Adaptation, International Development) είναι ένα λειτουργικό υδροστατικό μοντέλο με ημί-λανγκρανζιανό πλαίσιο εξισώσεων. Το μοντέλο αυτό αποτελείται από επιμέρους τμήματα που περιγράφουν τις διάφορες ατμοσφαιρικές διεργασίες όπως τον στροβιλισμό, τις επιρροές της ορεογραφίας και της βαρύτητας, λεπτομερή ανάλυση της μεταφοράς της θερμότητας, την κίνηση των σύννεφων και την ακτινοβολία. Η οριζόντια ανάλυση του πλέγματος είναι 10 Km και ενώ γίνεται ανάλυση σε 41 κάθετα επίπεδα. Το μοντέλο ALADIN αναβαθμίζει τις προβλέψεις του 4 φορές την ημέρα, που καλύπτουν την περίοδο των επόμενων δύο ημερών.

#### ECMWF

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική για την πρόβλεψη των μελλοντικών τιμών των καιρικών μεταβλητών, οι οποίες στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδοι στο νευρωνικό δίκτυο, είναι το E.C.M.W.F (European Center Meteorological Weather Forecasts) και χρησιμοποιείται από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία.

Στο E.C.M.W.F. τρέχουν δύο “φόρμες”. Η μία παράγει παγκόσμιες αναλύσεις για τέσσερις κύριες συνοπτικές ώρες στις 00, 06, 12 και 18UTC και δεκαήμερες προγνώσεις βασισμένες στην ανάλυση των 12UTC. Η δεύτερη παράγει αναλύσεις για την ίδια ώρα αλλά με μια μικρή διακοπή (cut – off) (μόνο μια ώρα αντί για τέσσερις, από την πιο κοντινή ώρα στην συλλογή δεδομένων). Σε ό,τι αφορά τις οριακές συνθήκες, τριήμερες παγκόσμιες προγνώσεις τρέχουν

τέσσερις φορές την ημέρα και από αυτές τις αναλύσεις παρέχονται στα Κράτη Μέλη οι οριακές συνθήκες για τα δικά τους μοντέλα περιορισμένης περιοχής.

Οι μεταβλητές του μοντέλου για τον υπολογισμό των προγνώσεων είναι η θερμοκρασία, ο άνεμος και η συγκεκριμένη υγρασία. Αυτές οι βασικές παράμετροι μετατρέπονται σε άλλες ατμοσφαιρικές παραμέτρους. Αυτές οι παράμετροι υπολογίζονται για ένα χρονικό διάστημα 3 ωρών από 3 έως 72 ώρες και κάθε 6 ώρες από 72 έως 240 ώρες βασισμένες στα στοιχεία των 12 UTC.

#### **4.4.2 Οι εξισώσεις του μοντέλου**

Από τις έξι εξισώσεις που επικρατούν στις πρωτογενείς εξισώσεις του ατμοσφαιρικού μοντέλου E.C.M.W.F., οι δύο από αυτές είναι διαγνωστικές και εκφράζουν την στατική σχέση μεταξύ διαφορετικών παραμέτρων:

Ο Νόμος Αερίων δίνει την σχέση μεταξύ πίεσης, πυκνότητας και θερμοκρασίας.

Η Υδροστατική Εξίσωση δείχνει την σχέση μεταξύ της πυκνότητας του αέρα και της αλλαγής της πίεσης με το ύψος.

Οι άλλες τέσσερις εξισώσεις είναι προγνωστικές και περιγράφουν τις αλλαγές με το χρόνο των συνιστωσών του οριζοντίου ανέμου, της θερμοκρασίας και της περιεκτικότητας υδρατμών σε ένα σωματίδιο του αέρα και της επιφανειακής πίεσης.

Η Εξίσωση Συνέχειας εκφράζει την διατήρηση της μάζας και καθορίζει την κάθετη ταχύτητα και την αλλαγή της πίεσης της επιφάνειας.

Η Εξίσωση Κίνησης περιγράφει πως η ορμή ενός μορίου του αέρα αλλάζει εξαιτίας της δύναμης βαροβαθμίδας και της δύναμης Coriolis. Σε αυτά επίσης συμπεριλαμβάνονται οι επιδράσεις της τριβής της ανάμιξης και της διακοπής των βαρυτικών κυμάτων (gravity wave breaking).

Η Θερμοδυναμική Εξίσωση εκφράζει πως μεταβάλλεται η θερμοκρασία ενός σωματιδίου του αέρα από την αδιαβατική ψύξη ή θέρμανση που υπόκειται εξαιτίας των κάθετων μετατοπίσεων. Άλλες φυσικές διαδικασίες όπως η συμπύκνωση, η εξάτμιση, η μεταφορά της διαταραχής (turbulent transport) συμπεριλαμβάνονται όπως επίσης και οι επιδράσεις της ακτινοβολίας.

Η Εξίσωση Διατήρησης για την Υγρασία υποθέτει ότι η περιεκτικότητα υγρασίας ενός σωματιδίου του αέρα είναι σταθερή, εκτός από τις απώλειες που οφείλονται στον υετό και στην συμπύκνωση ή τα “κέρδη” από την εξάτμιση από τα νέφη και βροχή ή από τους ωκεανούς και τα ηπειρωτικά. Σε αυτό το κομμάτι πρέπει να προστεθεί ότι υπάρχουν συγκεκριμένες προγνωστικές εξισώσεις για το κλάσμα των νεφών (cloud fraction), το νερό, την περιεκτικότητα πάγου και το όζον.

Η απελευθέρωση λανθάνουσας θερμότητας, η ακτινοβολία από τον ήλιο και την επιφάνεια της γης, οι διαδικασίες τριβής ή ανάμιξης (διάχυση) οι οποίες διέπονται από τις βασικές

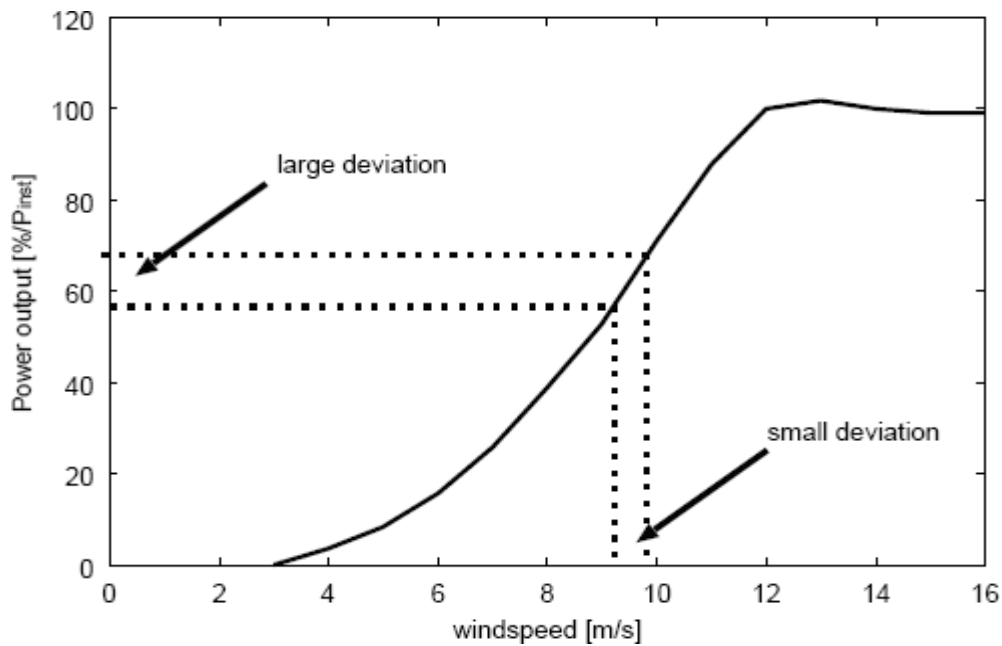
εξισώσεις, εξαιτίας της μικρής τους κλίμακας, περιγράφονται με στατιστικό τρόπο ως διαδικασίες παραμετροποίησης.

#### **4.5 Η επίδραση του σφάλματος των αριθμητικών προβλέψεων καιρού στην πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου**

Οι προβλέψεις του ανέμου για χρήση σε εφαρμογές αιολικής ενέργειας βασίζονται περισσότερο στην ταχύτητα του ανέμου και στην κατεύθυνσή του στα 50 με 100m πάνω από το επίπεδο του εδάφους, στην κορυφή του επιπέδου του ατμοσφαιρικού στρώματος και μόνο λίγο στην πρόβλεψη της πυκνότητας του αέρα. Εξαιτίας των συναρτήσεων μεταφοράς των διαθέσιμων ανεμογεννητριών, με καμπύλη ισχύος την παρακάτω, η μετατροπή της διαθέσιμης αιολικής ισχύος (η οποία εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου εις τον κύβο) σε πραγματική ισχύ μεταβάλλεται μη γραμμικά, με μηδενική έξοδο κάτω από ένα κατώφλι ταχύτητας στα 3 m/s, μια ξαφνική αύξηση στην έξοδο μέχρι η μηχανή να αποκτήσει την ονομαστική της ισχύ στα 15 m/s περίπου και μια σταθερή έξοδο πάνω από αυτό το επίπεδο, μέχρι την ταχύτητα αποκοπής στα 25 m/s.

Επειδή οι γεννήτριες σε ένα αιολικό πάρκο (ΑΠ) μπορεί να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους είτε από τις αναταράξεις κατά την εκκίνησή τους είτε εξαιτίας των τοπικών τοπογραφικών φαινομένων επιτάχυνσης και επιβράδυνσης, οι συναρτήσεις μεταφοράς ενός ΑΠ μπορεί να διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με την κατεύθυνση του ανέμου. Από την άλλη μεριά, οι γεννήτριες χρειάζονται ένα σημαντικό χρονικό περιθώριο ώστε να ευθυγραμμιστούν με τον άνεμο που επικρατεί, ειδικά όταν θα πρέπει να σταματήσουν ενώ έχουν ήδη αποκτήσει την μέγιστη ταχύτητά τους σε μια κατεύθυνση. Γι' αυτό και η αιολική ισχύς είναι επίσης συνάρτηση της μεταβολής της κατεύθυνσης του ανέμου και επιπλέον, η λειτουργία των γεννητριών μπορεί να επηρεαστεί από μικρές αναταράξεις του ανέμου.

Εξαιτίας της μη-γραμμικότητας των συναρτήσεων μεταφοράς, τα σφάλματα στην πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου έχουν σοβαρές επιπτώσεις. Τα σφάλματα σε χαμηλές ταχύτητες είναι αδιάφορα αφού ούτως ή αλλιώς η έξοδος εκεί είναι μηδενική όπως επίσης και τα σφάλματα στην περιοχή μεταξύ 12 και 25 m/s όπου η έξοδος είναι ευθεία και σταθερή, εκτός βέβαια και αν λάβουμε υπ' όψιν τις αλλαγές στην κατεύθυνση του ανέμου ή την ένταση των αναταράξεών του. Τα σφάλματα, όμως, στις μεσαίες ταχύτητες (3-12 m/s) και κοντά στην ταχύτητα αποκοπής (25 m/s) έχουν τις σημαντικότερες επιπτώσεις αφού, στην πρώτη περίπτωση, το παραμικρό σφάλμα στην ταχύτητα μπορεί να προκαλέσει μεγάλο σφάλμα στην ισχύ και στην δεύτερη περίπτωση, ακόμα χειρότερα, το σύστημά μας μεταβαίνει από την κατάσταση όπου έχει αποκτήσει την μέγιστη έξοδο σε κατάσταση μηδενικής εξόδου (ή αντίστροφα).



**Σχήμα 4.3:** Καμπύλη ισχύος μιας τυπικής ανεμογεννήτριας και αποκλίσεις. Για μικρή μεταβολή ταχύτητας ανέμου έχουμε μεγάλη μεταβολή στην παραγωγή ισχύος.

Η ταχύτητα του ανέμου στην επιφάνεια της γης και η κατεύθυνσή του επηρεάζονται από τα τοπογραφικά φαινόμενα σε διαφορετικό βαθμό, γεγονός που κάνει την ανάλυση της πρόβλεψης του ανέμου ιδιαίτερος σχετική. Τα επιφανειακά προφίλ εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους, όπως η τραχύτητα και η στατική σταθερότητα και κατά συνέπεια, οι προβλέψεις των ανέμων χαμηλού ύψους αναμένεται να επηρεάζονται από τις παραμέτρους των οριακών στρωμάτων σε ένα μοντέλο αριθμητικών προβλέψεων καιρού. Από την άλλη, οι άνεμοι χαμηλού υψομέτρου μπορεί να ενισχύονται από ετερογένειες στην επιφανειακή θερμοκρασία προκαλούμενες από σημαντικές αποκλίσεις στις ιδιότητες του εδάφους, με αποτέλεσμα την εμφάνιση φαινομένων ελαφρών ρευμάτων αέρα, το οποίο δείχνει τη σχετικότητα του επιφανειακού μοντέλου.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

---

### 5.1 Εισαγωγή

Η πρόβλεψη της αιολικής ισχύος είναι απαραίτητη έτσι ώστε να καθίσταται δυνατή η διαχείριση και η ενσωμάτωσή της στα σύγχρονα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο. Συνεπώς, ερευνητικά κέντρα και εταιρείες έχουν επενδύσει κατά τις τελευταίες δεκαετίες, στην ανάπτυξη των μεθόδων και των λειτουργικών εργαλείων, οδηγώντας σε μια πληθώρα μοντέλων πρόβλεψης αιολικής παραγωγής. Τα εργαλεία αυτά χαρακτηρίζονται από τον ορίζοντα της πρόβλεψης (μερικά λεπτά, ώρες ή ημέρες), τις υπολογιστικές μονάδες και την επιθυμητή ακρίβεια. Κοινό χαρακτηριστικό των ποικίλων μοντέλων πρόβλεψης αιολικής ισχύος που έχουν αναπτυχθεί, είναι η χρήση αποτελεσμάτων από τη μετεωρολογία και τις Αριθμητικές Προβλέψεις Καιρού που αναλύθηκαν προηγουμένως.

Με τον όρο μοντέλο θεωρούμε μια μαθηματική αναπαράσταση της πραγματικότητας. Τα μοντέλα πρόβλεψης μπορούν να διακριθούν σε διάφορες κατηγορίες. Τα απλά μοντέλα, τα οποία βασίζονται στην κλιματολογία και σε μετρήσεις προηγούμενων ετών, ονομάζονται μοντέλα αναφοράς και είναι εύκολο να εφαρμοστούν. Τέτοια μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέτρα σύγκρισης. Επίσης, υπάρχουν τα εξελιγμένα μοντέλα, τα οποία χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τις μελέτες που γίνονται για τη μετάβαση από τις μετεωρολογικές προβλέψεις στην αναμενόμενη παραγωγή αιολικής ισχύος. Η πρώτη περίπτωση είναι η λεγόμενη φυσική προσέγγιση, που επικεντρώνεται στην περιγραφή της ροής του ανέμου στην περιοχή που βρίσκεται το αιολικό πάρκο αλλά και γύρω από αυτή. Η δεύτερη είναι η στατιστική προσέγγιση που μοντελοποιεί τα ιστορικά δεδομένα και τις μετεωρολογικές προβλέψεις με την παραγόμενη ισχύ, χωρίς να γίνονται υποθέσεις για τα φυσικά φαινόμενα.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια σύντομη περιγραφή των προσεγγίσεων που χρησιμοποιούν τα ευρύτερα διαδεδομένα μοντέλα πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής, καθώς επίσης αναλύονται οι θεμελιώδεις αρχές που ακολουθούν. Τέλος, γίνεται αναφορά στα πιθανοτικά μοντέλα πρόβλεψης της αιολικής ισχύος.

### 5.2 Χρονικοί ορίζοντες των μοντέλων πρόβλεψης

Η παραγωγή αιολικής ισχύος που προβλέπεται στη συγκεκριμένη χρονική στιγμή  $t$  για μια χρονική στιγμή  $t+k$  είναι η μέση ισχύς  $p_{t+k|t}$  που αναμένεται να παράγει ένα αιολικό πάρκο σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα αν λειτουργούσε υπό συνεχή σταθερό άνεμο. Οι προβλέψεις γίνονται για ένα χρονικό ορίζοντα  $T$ , δείχνοντας το συνολικό μέγεθος της περιόδου προβλέψεως (π.χ. 72 ώρες μπροστά) στο μέλλον. Η χρονική ανάλυση της πρόβλεψης υποδηλώνεται από το χρονικό βήμα  $k$ , το οποίο είναι σχετικό με το μέγεθος του

χρονικού ορίζοντα. Τα περισσότερα συστήματα πρόβλεψης παρέχουν πρόβλεψη της παραγόμενης ισχύος από 0 έως 72 ώρες και με ανάλυση μιας ώρας. Η προβλεπόμενη ποσότητα είναι μέση ωριαία τιμή αιολικής παραγωγής. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο χρονικός ορίζοντας πρόβλεψης είναι πολύ σημαντικός, διότι υπάρχει σημαντική διαφορά ανάμεσα στις λεγόμενες βραχυπρόθεσμες προβλέψεις, κλίμακας ορισμένων ημερών και στις πολύ βραχυπρόθεσμες προβλέψεις, τάξης λίγων ωρών. Ενώ μακρύτερες περίοδοι περιγράφονται καλύτερα από αριθμητικά συστήματα πρόβλεψης καιρού, τα οποία μοντελοποιούν λεπτομερώς τη δυναμική της ατμόσφαιρας, μικρότερα χρονικά διαστήματα κυριαρχούνται από μόνιμες μετεωρολογικές συνθήκες, όπου απλές στατιστικές προσεγγίσεις οδηγούν σε καλύτερα αποτελέσματα πρόβλεψης.

Η πρόβλεψη της αιολικής ισχύος κατηγοριοποιείται σε κάποια από τις 3 ακόλουθες κατηγορίες με κριτήριο το χρονικό της ορίζοντα:

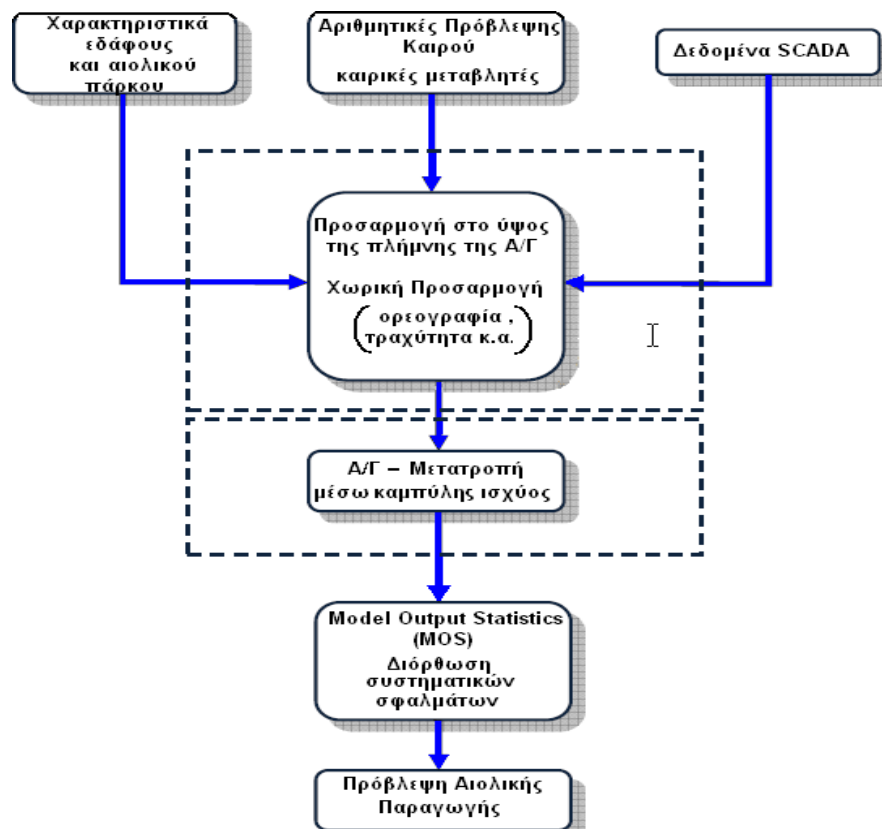
- **Πολύ βραχυπρόθεσμες προβλέψεις :** Ο χρονικός τους ορίζοντας είναι μερικές ώρες, χωρίς να υπάρχει ωστόσο συμφωνία για τον αριθμό των ωρών. Οριακές τιμές των 4 ή των 9 ωρών απαντώνται στη βιβλιογραφία. Η εφαρμογή των προβλέψεων αυτού του χρονικού ορίζοντα για έναν ιδιοκτήτη αιολικού πάρκου εξαρτάται από τους κανόνες της αγοράς, για παράδειγμα αυτές οι προβλέψεις μπορούν να φανούν χρήσιμες για συναλλαγές σε αγορές που μεταβάλλονται καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας.
- **Βραχυπρόθεσμες προβλέψεις :** Ο χρονικός τους ορίζοντας κυμαίνεται από το όριο των πολύ βραχυπρόθεσμων προβλέψεων μέχρι τις 48 ή 72 ώρες. Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον συγκεντρώνουν οι προβλέψεις τέτοιου χρονικού ορίζοντα, με πιο άμεσα ενδιαφερόμενη την αγορά βασισμένη στην «επόμενη ημέρα». Για παράδειγμα στην Ιβηρική Αγορά Ηλεκτρισμού (MIBEL4, ημερήσια αγορά), οι προσφορές για πώληση ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να παρουσιάζονται μέχρι τις 10:00 π.μ. και γι' αυτό ένας 38ωρος χρονικός ορίζοντας καλύπτει τις ανάγκες ολόκληρης της επόμενης ημέρας. Σε άλλες χώρες η περίοδος παρουσίασης των προσφορών είναι διαφορετική (π.χ. στις Η.Π.Α. κυμαίνεται από τις 5:00 π.μ. μέχρι τις 12 το μεσημέρι), έτσι ο χρονικός ορίζοντας των προβλέψεων μπορεί να προσαρμοστεί ανάλογα. Οι προβλέψεις αυτές, ιδίως όταν ο ορίζοντας είναι 72 ώρες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για προγραμματισμούς συντήρησης.
- **Μεσοπρόθεσμες προβλέψεις :** Ο χρονικός τους ορίζοντας κυμαίνεται από το όριο των βραχυπρόθεσμων προβλέψεων μέχρι συνήθως τις 7 ημέρες. Όσο αυξάνεται ο ορίζοντας τόσο αυξάνουν και τα σφάλματα. Αυτές οι προβλέψεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν από συμβατικά εργοστάσια παραγωγής ενέργειας (π.χ. μονάδες άνθρακα) ως είσοδος στη διαχείριση μονάδων τους (unit commitment), αλλά και κατά τον προγραμματισμό της συντήρησής τους. Ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας τις προβλέψεις αυτές ως εισόδους, είναι δυνατόν να προγραμματιστεί η συντήρηση και των γραμμών μεταφοράς αλλά και των αιολικών πάρκων. Οι μεσοπρόθεσμες προβλέψεις (3 έως 7 ημερών) για λειτουργικές χρήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν, με μεμονωμένη χρήση μοντέλων αριθμητικών προβλέψεων καιρού από μεγάλα κέντρα όπως το ECMWF, που αναφέρθηκε προηγουμένως.

## 5.3 Μοντέλα φυσικών προσεγγίσεων

### 5.3.1 Εισαγωγή

Τα μοντέλα φυσικών προσεγγίσεων για την πρόβλεψη της παραγωγής αιολικής ενέργειας, επικεντρώνονται στην περιγραφή της ροής του ανέμου γύρω και μέσα στο αιολικό πάρκο και επιπλέον χρησιμοποιούν την καμπύλη ισχύος του κατασκευαστή, για να διαμορφώσουν μια εκτίμηση της εξόδου της αιολικής ισχύος. Οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού χρησιμοποιούνται ως αρχικοποίηση για τη διαδικασία ανάλυσης και προσομοίωσης της ροής του ανέμου. Επιπλέον, τα μοντέλα μέσης κλίμακας και τα CFD μοντέλα, λειτουργούν εμφωλιασμένα σε κάποιο κομμάτι του οριζόντιου πλέγματος ενός μοντέλου αριθμητικών προβλέψεων καιρού και συνήθως αποτελούν μέρος των φυσικών μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής ενέργειας. Στόχος τους είναι η λεπτομερής περιγραφή του οριακού ατμοσφαιρικού επιπέδου πολύ κοντά στην επιφάνεια της γης, πάνω από την περιοχή ενδιαφέροντος (τοποθεσία αιολικού πάρκου).

Η φυσική προσέγγιση του προβλήματος της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος είναι σαφώς καθορισμένη και αποτελείται από τρία στάδια επεξεργασίας: τη βαθμονόμηση προς τα κάτω, τον μοντελισμό καμπύλης ισχύος και τη στατιστική διόρθωση απόκρισης.



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα παρουσίασης σταδίων μιας φυσικής προσέγγισης



Στο στάδιο της βαθμονόμησης προς τα κάτω, η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου προσαρμόζονται στο ύψος της πλήμνης της Α/Γ, μια διαδικασία που μπορεί να χαρακτηριστεί ως προσαρμογή των αποτελεσμάτων των αριθμητικών προβλέψεων καιρού στα δεδομένα του αιολικού πάρκου και των Α/Γ. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο οι φυσικές προσεγγίσεις χρησιμοποιούν μετεωρολογικά μοντέλα μεσαίας ή μικρής κλίμακας. Τα μοντέλα NWP χρησιμοποιούν συνήθως χωρικές αναλύσεις της τάξης των 10 έως 15 χιλιομέτρων. Αρχικό μέλημα είναι ο προσδιορισμός του επιπέδου, στο οποίο θα γίνει πιο ακριβής εκτίμηση των ατμοσφαιρικών μεταβλητών από τα μοντέλα των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, για την αρχικοποίηση των μοντέλων μικρότερης κλίμακας (η καλύτερη απόδοση συνήθως εντοπίζεται στα χαμηλότερα επίπεδα πίεσης της τάξης των 10 μέτρων). Τα τελευταία εκτελούνται σε κάθε αναβάθμιση των αριθμητικών προβλέψεων καιρού ή σε πολλές άλλες περιπτώσεις προσομοιώνουν τη ροή του ανέμου, με βάση έναν πρότυπο πίνακα, που περιέχει τις τυπικές περιπτώσεις της εξέλιξης της ροής. Ο συμβουλευτικός πρότυπος πίνακας δημιουργείται με κάποια μέθοδο ταξινόμησης, όπως η ανάλυση συστάδων (clustering analysis).

Για την αναβάθμιση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών προβλέψεων καιρού απαιτούνται κάποιες από τις φυσικές παραμέτρους του εδάφους, όπως η τραχύτητα, η ορεογραφία, η παρουσία εμποδίων, η θερμική διαστρωμάτωση κ.α., με σκοπό την αναγνώριση του λογαριθμικού προφίλ του ανέμου, δηλαδή τη μελέτη του στον κατακόρυφο άξονα. Στο σημείο αυτό μπορεί να φανεί χρήσιμος και ο κώδικας της Υπολογιστικής Δυναμικής των Ρευστών (Computational Fluid Dynamics - CFD), ο οποίος δίνει τη δυνατότητα ακριβούς υπολογισμού του πεδίου των ανέμων στο αιολικό πάρκο, λαμβάνοντας υπόψη μια πλήρη περιγραφή του εδάφους του πάρκου. Η απαιτούμενη είσοδος κατά το στάδιο της βαθμονόμησης συμπεριλαμβάνει μια λεπτομερή περιγραφή της τοπολογίας του πάρκου, της τραχύτητας του εδάφους της ορεογραφίας κ.α.

Το βήμα της μετατροπής της ταχύτητας ανέμου σε ισχύ, υπολογισμένης στο ύψος της πλήμνης της Α/Γ, περιλαμβάνει κυρίως τη μετατροπή με βάση την καμπύλη ισχύος. Η χρήση της καμπύλης ισχύος του κατασκευαστή είναι η απλούστερη προσέγγιση, ωστόσο πρόσφατες έρευνες από διάφορες ομάδες έδειξαν ότι είναι πολύ προτιμότερο η καμπύλη ισχύος να εκτιμάται μέσω των διαθέσιμων προβλέψεων της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου αλλά και της αιολικής ισχύος, δηλαδή μιας προσέγγισης της καμπύλης ισχύος με βάση τα στοιχεία του αιολικού πάρκου.

Προκειμένου να υπολογίσουμε τα συστηματικά σφάλματα των προβλέψεων που θα μπορούσαν να αποδοθούν στις αριθμητικές προβλέψεις καιρού ή την προσέγγιση της μοντελοποίησης που ακολουθούν, οι μελετητές συχνά διεξάγουν στατιστικές διορθώσεις απόκρισης (MOS) για μετά-επεξεργασία των προβλέψεων ισχύος. Για ένα NWP μοντέλο οι στατιστικές σχέσεις μεταξύ, των προβλεπόμενων από το μοντέλο, μεταβλητών και των παρατηρούμενων καιρικών μεταβλητών χρησιμοποιούνται τόσο για τη διόρθωση των πρώτων όσο και για πρόβλεψη άλλων μεταβλητών που δεν υπολόγιζε με σαφήνεια το μοντέλο. Οι μέθοδοι, με χρήση πολυγραμμικών εξισώσεων, παράγουν προβλέψεις καιρικών μεταβλητών, οι οποίες έως ένα βαθμό σχετίζονται με τα τυχαία ή συστηματικά σφάλματα των μοντέλων NWP. Το βασικό μειονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι ότι απαιτούν δεδομένα από μετρήσεις (online ή offline) και καλή ποιότητα δεδομένων.

### 5.3.2 Περιγραφή κυριότερων μοντέλων φυσικών προσεγγίσεων

Το πρώτο μοντέλο φυσικής προσέγγισης που θα περιγραφεί είναι το Previento, το οποίο αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο του Oldenburg, της Γερμανίας. Το Previento χρησιμοποιεί δεδομένα NWP από το Localmodell (LM) της Γερμανικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (DWD). Το Previento, με διάφορα υπο-μοντέλα, βελτιώνει τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού μοντελοποιώντας τις τοπικές συνθήκες της περιοχής. Σύμφωνα με τον Moennich, το σημαντικότερο υπο-μοντέλο είναι αυτό για την ατμοσφαιρική σταθερότητα, καθώς τα μοντέλα για την ορεογραφία και την τραχύτητα δεν οδηγούν πάντα σε βελτίωση των αποτελεσμάτων. Επίσης, λαμβάνονται υπόψη φαινόμενα σκίασης των ανεμογεννητριών. Χρησιμοποιώντας συγκεκριμένα χαρακτηριστικά μιας ανεμογεννήτριας, υπολογίζεται η αναμενόμενη σε μια μεμονωμένη περιοχή παραγωγή αιολικής ισχύος. Ωστόσο επειδή στην πράξη μας ενδιαφέρει η συνολική ισχύς των αιολικών πάρκων που είναι διασπαρμένα σε μια ευρύτερη περιοχή, το Previento περιλαμβάνει έναν εξελιγμένο αλγόριθμο αναβάθμισης (up-scaling algorithm), ο οποίος βασίζεται σε αντιπροσωπευτικά αιολικά πάρκα στην επιθυμητή περιοχή για να εξάγει αποτελέσματα για ευρύτερες περιοχές και ακόμα και για ολόκληρη τη χώρα. Η στατιστική διόρθωση του λάθους πρόβλεψης συναρτήσεως των καιρικών συνθηκών, με τη χρήση MOS, θεωρείται απαραίτητη. Όσον αφορά την καμπύλη ισχύος, παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ της θεωρητικής και αυτής που προκύπτει από την εκτίμηση των δεδομένων, αλλά επίσης αποκλίσεις παρατηρούνται και στις εκτιμήσεις των καμπυλών ισχύος ανάμεσα στα διάφορα έτη. Το μεγαλύτερο μέρος του σφάλματος της πρόβλεψης του Previento, θεωρείται ότι οφείλεται στο μοντέλο NWP.

Ένα μοντέλο που χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό είναι το Prediktor, που παρουσιάστηκε στην αρχική του μορφή από τον Landberg. Το μοντέλο αυτό βασιζόταν σε φυσικές παραμετροποιήσεις, παρόμοιες με τη μεθοδολογία του Ευρωπαϊκού Αιολικού Χάρτη και χρησιμοποιούσε προβλέψεις της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου. Οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού προέρχονταν από το μοντέλο DMI HIRLAM. Η βασική ιδέα του μοντέλου ήταν να μετατρέψει το προβλεπόμενο διάνυσμα του ανέμου στις τοπικές συνθήκες του πάρκου. Για να γίνει αυτό, χρησιμοποιούνταν δύο τιμές της ταχύτητας. Αρχικά, με την τιμή της ταχύτητας από τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού, που αντιστοιχεί στα 10 μέτρα πάνω από το έδαφος, υπολογίζεται η μέση τιμή της τραχύτητας της περιοχής. Στη συνέχεια, η τιμή της ταχύτητας του ανέμου, που αντιστοιχεί σε ένα από τα υψηλότερα επίπεδα της ατμόσφαιρας, λαμβάνεται ως ίση με την τιμή του γεωστροφικού ανέμου. Έτσι, από τον νόμο της γεωστροφικής επιβράδυνσης, υπολογίζεται η ταχύτητα τριβής του ανέμου και, παράλληλα, με την εξίσωση του λογαριθμικού προφίλ του ανέμου, προσεγγίζεται η τιμή της ταχύτητας στο ύψος της πλήμνης. Επειδή όμως, οι τιμές της ταχύτητας προέρχονται από το μοντέλο των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι τοπικές επιδράσεις. Η προσομοίωση της ροής του ανέμου στην περιοχή ενδιαφέροντος γίνεται πρώτα με το μέσο-κλιμακούμενο μοντέλο KAMM (Karlsruhe Atmospheric Mesoscale Model) και στη συνέχεια με το μικρό-κλιμακούμενο μοντέλο WASP (Wind Atlas Analysis and Application Program). Το WASP μοντελοποιεί τα εμπόδια της περιοχής, την τραχύτητα και τις αλλαγές της, καθώς και τις επιδράσεις της ορεογραφίας. Αντίθετα, δεν περιλαμβάνει

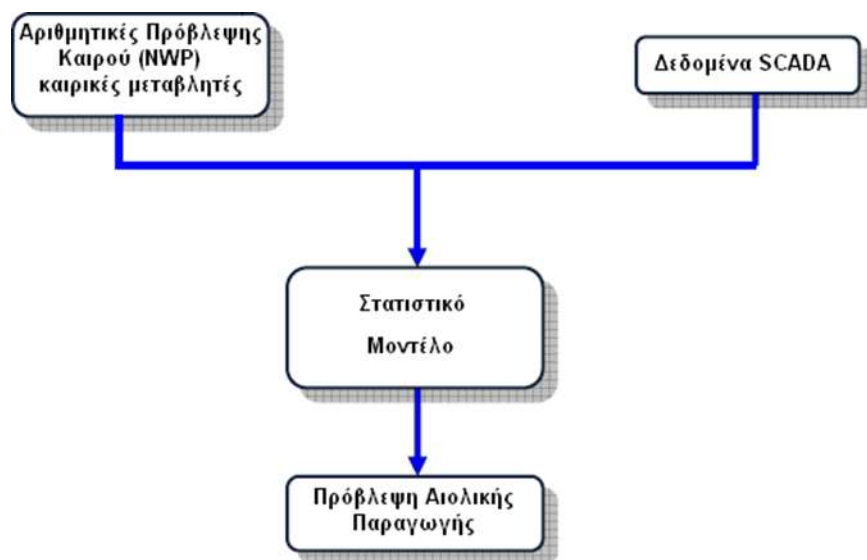
μονάδες που να περιγράφουν τα θερμικά φαινόμενα, όπως το φαινόμενο όρους/κοιλιάδας ή τη γέφυρα θάλασσας/εδάφους. Η εκτίμηση του ανέμου στην περιοχή του πάρκου, όπως διαμορφώνεται από το μοντέλο WASP, βελτιώνεται με τη χρήση στατιστικής διόρθωσης απόκρισης. Ένας συντελεστής διόρθωσης πολλαπλασιάζεται με την τιμή της ταχύτητας, με αποτέλεσμα να μειωθεί το συστηματικό σφάλμα της πρόβλεψης. Έτσι, προκύπτει η προκαταρκτική πρόβλεψη της αιολικής ισχύος, μετατρέποντας την ταχύτητα του ανέμου, μέσω των καμπύλων ισχύος των Α/Γ του πάρκου. Παράλληλα, το φαινόμενο σκίασης των Α/Γ περιγράφεται με το μοντέλο PARK. Αυτό το μοντέλο δημιουργεί ένα ροδοδιάγραμμα της αποτελεσματικότητας του πάρκου, δηλαδή χαρτογραφείται η μείωση της παραγωγής του πάρκου, που προέρχεται από τη σκίαση των Α/Γ, σε σχέση με τη διεύθυνση του ανέμου. Το μοντέλο PARK θεωρεί ότι το φάσμα του κυματισμού πίσω από την Α/Γ αυξάνεται γραμμικά και ότι η μείωση της επίδρασης του κυματισμού στις άλλες Α/Γ είναι αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο της απόστασης από την Α/Γ. Τέλος εφαρμόζεται και δεύτερη στατιστική διόρθωση απόκρισης στην πρόβλεψη της αιολικής ισχύος. Προϋπόθεση για την εκτίμηση των παραμέτρων των μοντέλων στατιστικής απόκρισης, είναι να υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα τουλάχιστον τεσσάρων μηνών.

Το μοντέλο Ewind, που αναπτύχθηκε από την True Wind Inc, συνδυάζει τις φυσικές θεωρήσεις με στατιστικές μεθόδους. Το EWind χρησιμοποιεί αριθμητικά ατμοσφαιρικά μοντέλα και προσαρμοστικές στατιστικές τεχνικές, οι οποίες μπορούν να διαμορφωθούν έτσι, ώστε να παρέχουν ακριβή πρόβλεψη ταχύτητας ανέμου. Το σύστημα προβλέπει την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου και στη συνέχεια μετατρέπει τις προβλέψεις αυτές σε παραγόμενη ισχύ. Τα στοιχεία που συλλέγονται από τον χώρο πρόβλεψης, έχουν τη δυνατότητα συνεχούς ανατροφοδότησης, έτσι ώστε να παρέχουν τις καλύτερες δυνατές προβλέψεις σε όλο το διάστημα. Το Ewind, αντίθετα με τα περισσότερα μοντέλα, έχει δυνατότητα παγκόσμιας πρόβλεψης. Η αρχική διαμόρφωση του EWind χρησιμοποιεί ένα μέσης κλίμακας μοντέλο MASS (Mesoscale Atmospheric Simulation System Model), για να κάνει προβλέψεις καιρού (η τρέχουσα έκδοση του είναι ένα μη υδροστατικό μοντέλο, παρόμοιο με το MM5). Ωστόσο, τώρα χρησιμοποιούνται και άλλα μέσης κλίμακας μοντέλα, όπως τα ForeWind, MM5, WRF, COAMPS, workstation-ETA και OMEGA (το μοντέλο αυτό εκτελείται πάνω σ' ένα μοναδικό, αδόμητο δίκτυο με μεταβλητή ανάλυση, η οποία επιτρέπει υψηλότερη ανάλυση σε σημεία ενδιαφέροντος, όπως βουνά και ακτογραμμές καθώς και γύρω από κινούμενα καιρικά συστήματα). Οι προβλέψεις των ατμοσφαιρικών μοντέλων τροφοδοτούν τα προσαρμοστικά στατιστικά μοντέλα. Τα στατιστικά μοντέλα είναι ένα σύνολο σχέσεων μεταξύ της εξόδου των βασισμένων στη φυσική ατμοσφαιρικών μοντέλων και των μεταβλητών, που πρόκειται να προβλεφθούν για μια τοποθεσία, όπως πχ. η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου και η πυκνότητα του αέρα στη θέση των Α/Γ. Τα στατιστικά μοντέλα, στην ουσία, βασίζονται στη γραμμική παλινδρόμηση πολλών μεταβλητών και στα νευρωνικά δίκτυα. Το πρώτο είδος στατιστικών μοντέλων επιλέγει αυτόματα τις καλύτερες προγνωστικές μεταβλητές από το ατμοσφαιρικό μοντέλο. Πέρα από την πρόβλεψη του ανέμου, οι μεταβλητές εισόδου μπορεί να περιλαμβάνουν θερμοκρασία, μεταβλητότητα, συννεφιά, και άλλες παραμέτρους. Τα νευρωνικά δίκτυα του EWind συνδυάζονται και με αλυσίδες Markov.

## 5.4 Μοντέλα στατιστικών προσεγγίσεων

### 5.4.1 Γενικά

Οι στατιστικές προσεγγίσεις είναι προϊόν της προσπάθειας των ερευνητών του τομέα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος να επιτύχουν αποδοτικό μετασχηματισμό της ατμοσφαιρικής κατάστασης, όπως αυτή περιγράφεται από τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού σε αιολική ενέργεια χωρίς περαιτέρω φυσικές θεωρήσεις και παραμετροποιήσεις της ροής του ανέμου στην επιλεγμένη περιοχή. Αντίθετα, συνδυάζουν στατιστικές συσχετίσεις παλαιότερων τιμών ισχύος και παλαιότερων τιμών και προβλέψεων διαφόρων μεταβλητών με τις μετρήσεις της αιολικής ισχύος. Σε αντίθεση με τη φυσική προσέγγιση οι στατιστικές μέθοδοι περιλαμβάνουν ένα μόνο βήμα, αυτό της στατιστικής επεξεργασίας για την απευθείας μετατροπή των μεταβλητών εισόδου σε αιολική παραγωγή. Τα δεδομένα που απαιτούνται για τη στατιστική αυτή επεξεργασία περιλαμβάνουν ταχύτητες και διευθύνσεις ανέμου, θερμοκρασίες κ.τ.λ., τα οποία είναι διαθέσιμα μέσω των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, και online μετρήσεις της αιολικής ισχύος, της ταχύτητας και της διεύθυνσης ανέμου κ.α. οι οποίες δίνονται από ένα σύστημα SCADA. Έχοντας τα δεδομένα αυτά, τα μοντέλα που προσεγγίζουν την πρόβλεψη αιολικής ισχύος με στατιστικές μεθόδους μπορούν να δώσουν εκτίμηση της εξόδου του αιολικού πάρκου σε ένα μόνο βήμα χωρίς περαιτέρω φυσικές θεωρήσεις, όπως φαίνεται και από τα αντίστοιχα διαγράμματα που ακολουθούν:



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα παρουσίασης σταδίων μιας στατιστικής προσέγγισης

Επί της ουσίας, για τη θεμελίωση μιας στατιστικής προσέγγισης, το κυρίαρχο μέλημα του ερευνητή είναι να βρει την πιο κατάλληλη συνάρτηση  $f$ , που να μεταφέρει τον χώρο του διανύσματος που περιγράφει την ατμοσφαιρική κατάσταση, στο χώρο της αιολικής ισχύος. Η επιλογή της συνάρτησης μεταφοράς  $f$ , καθώς και ο υπολογισμός των παραμέτρων της,

πραγματοποιείται με τη συσχέτιση της χρονοσειράς των μετρήσεων της εξόδου του υπό μελέτη πάρκου με τις αντίστοιχες για κάθε χρονική στιγμή αριθμητικές προβλέψεις καιρού. Με άλλα λόγια, η συνάρτηση μεταφοράς  $f$  δέχεται ως είσοδο την περιγραφή της προβλεπόμενης ατμοσφαιρικής κατάστασης και την ανάγει σε αιολική παραγωγή.

Σήμερα οι κύριες εξελίξεις στις στατιστικές προσεγγίσεις της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, εστιάζουν στη χρήση πολλαπλών μετεωρολογικών προβλέψεων (συνόλων) σαν συνδυασμό εισόδου και πρόβλεψης. Την ίδια στιγμή, οι σχεδιασμοί επίσης εστιάζουν στη χρήση χωρικά διανεμημένων δεδομένων από μετρήσεις, για τη διόρθωση των σφαλμάτων των προβλέψεων (κυρίως φασικών σφαλμάτων) ή για την προειδοποίηση σε περίπτωση μεγάλης αβεβαιότητας.

#### 5.4.2 Περιγραφή κυριότερων μοντέλων στατιστικών προσεγγίσεων

Το πιο ευρέως διαδεδομένο αυτό-παλινδρομικό μοντέλο πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, φαίνεται να είναι το **WPPT** (Wind Power Prediction Tool- εργαλείο πρόβλεψης αιολικής ισχύος), που αναπτύχθηκε στον τομέα IMM (Informatics and Mathematical Modeling) του πολυτεχνείου DTU (Denmark Technical University) της Δανίας. Οι μέθοδοι εκτίμησης των παραμέτρων που εφαρμόστηκαν στο WPPT, είναι η τοπικά σταθμισμένη παλινδρόμηση (off-line) και η αναδρομική μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων (on-line).

Ένα άλλο μοντέλο είναι το **SIPREOLICO** το οποίο αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο Carlos III της Μαδρίτης. Το εργαλείο αυτό χρησιμοποιεί δεδομένα από το HIRLAM για την Ισπανία και επίσης συμπεριλαμβάνει ωριαία δεδομένα από το SCADA από το 80% του συνόλου των ανεμογεννητριών. Αυτές οι εισοδοί χρησιμοποιούνται στη συνέχεια σε μη παραμετρικά στατιστικά μοντέλα, μαζί με διαφορετικές καμπύλες ισχύος. Υπάρχουν εννιά διαφορετικά μοντέλα, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα των δεδομένων: ένα μοντέλο ανάλυσης των χρονοσειρών, χωρίς είσοδο από NWP. Άλλα τρία μοντέλα περιλαμβάνουν υψηλές προϋποθέσεις για την ταχύτητα του ανέμου, ενώ τρία επιπλέον λαμβάνουν υπόψη και τη διεύθυνση του ανέμου. Τα δύο τελευταία αποτελούν συνδυασμούς των προαναφερθέντων και επίσης μιας μη-παραμετρικής πρόβλεψης του ημερήσιου κύκλου. Χρησιμοποιείται ένας αυτοπαλινδρομικός εκτιμητής ελαχίστων τετραγώνων και το φίλτρο Kalman (εκτιμητής του γραμμικού προβλήματος ελαχίστων τετραγώνων). Τέλος, τα αποτελέσματα από τα 18 μοντέλα, συγκρίνονται και συναγωνίζονται το ένα το άλλο. Ανάλογα με την απόδοσή τους, γίνεται ένας συνδυασμός των αποτελεσμάτων των καλύτερων μοντέλων και στη συνέχεια υπολογίζεται η έξοδος ισχύος σαν σταθμισμένος μέσος όρος των αποτελεσμάτων αυτών. Το μόνο πρόβλημα που υπάρχει είναι ο συνδυασμός του ισπανικού HIRLAM με το πολύπλοκο έδαφος.

Το ISET (Institut für Solare Energieversorgungstechnik) σχεδίασε έναν αλγόριθμο που θα δίνει online υπολογισμούς της συνολικής παραγωγής ισχύος βασισμένος σε δεδομένα που συλλέγονται σε μερικά ενδεικτικά αιολικά πάρκα. Το μοντέλο ονομάστηκε Advanced Wind Power Prediction Tool (**AWPT**) και από το 2000 χρησιμοποιεί τις μετεωρολογικές προβλέψεις της Γερμανικής Μετεωρολογικής υπηρεσίας (DWD) και νευρωνικά δίκτυα. Οι Ernst και Rohrig περιέγραψαν τη διαδικασία της πρόβλεψης, η οποία τους επέτρεψε την



πρόβλεψη του 95% της συνολικής αιολικής ισχύος της Γερμανία. Έγινε χρήση δεδομένων από 16 αιολικά πάρκα (συνολικά γύρω στα 425MW), που περνάνε μέσα από ένα κατάλληλο νευρωνικό δίκτυο για να προκύψει η συνολική έξοδος, που είναι γύρω στα 3.2GW για όλα τα αιολικά πάρκα που βρίσκονται στην περιοχή που έγιναν οι έρευνες (περίπου 5000 ανεμογεννήτριες).

Για την ανάπτυξη μοντέλου πρόβλεψης αιολικής ισχύος, αναδρομικό πολυεπίπεδο αναγνωριστή υψηλής τάξης χρησιμοποίησε και ο Καρινιωτάκης. Η διαφορά αυτού του αναγνωριστή με του Sipreólico, είναι ότι οι κόμβοι ενός επιπέδου συνδέονται με τους κόμβους του ίδιου επιπέδου, μέσω του γινομένου τους. Το μοντέλο ονομάζεται **AWPPS** και αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος της Ευρωπαϊκής Ένωσης LEMNOS, τέθηκε σε on-line λειτουργία στο νησί της Λήμνου και έδινε προβλέψεις για τις επόμενες 12 ώρες, χρησιμοποιώντας τις χρονοσειρές των μετρήσεων της ταχύτητας του ανέμου και της παραγόμενης ισχύος. Σε μία επόμενη δημοσίευση του ίδιου, συγκρίνονται τα μοντέλα ARMA, νευρωνικά δίκτυα wavelet, πολυεπίπεδοι αναγνωριστές, αναδρομικά νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης και μοντέλα ασαφούς λογικής. Αυτή η μελέτη έδειξε ότι τα μοντέλα ασαφούς λογικής αποδίδουν καλύτερα. Η μελέτη αυτή έγινε στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος CARE, που είχε σκοπό τη δημιουργία και ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος και την εγκατάστασή τους στην Κρήτη και στη Μαδέρα της Ισπανίας. Τα μοντέλα ασαφούς λογικής διακριτοποιούν κάθε μεταβλητή εισόδου σε ασαφή σύνολα και την περιγράφουν με συναρτήσεις συμμετοχής. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια κανόνων του τύπου «If ... then ...», προκύπτει το αποτέλεσμα. Στο επίπεδο εξόδου του ασαφούς μοντέλου, ο Καρινιωτάκης πρόσθεσε ARX μοντέλα. Για την εκπαίδευση των ασαφών μοντέλων εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος του οπισθοδρομικής διάδοσης σφάλματος, με κριτήριο γενίκευσης τη μέθοδο της αντεπικύρωσης (cross-validation criterion). Η τελική μορφή του μοντέλου εφαρμόστηκε σε πολλά τοπικά και εθνικά δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, με επιτυχία. Τέλος, στο μοντέλο που ονομάζεται πλέον **AWPPS** (Advanced Wind Power Prediction System), ενσωματώθηκε μία μονάδα εκτίμησης της αβεβαιότητας της πρόβλεψης, σχεδιασμένη από τον Pinson, στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος ANEMOS.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι σε πολλές δημοσιεύσεις έχει προσεγγιστεί το πρόβλημα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, με τη χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Οι μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης αποδείχθηκαν κατάλληλες να περιγράψουν τόσο την αυτό-παλινδρομική συμπεριφορά της χρονοσειράς της αιολικής ισχύος, όσο και τις σχέσεις μεταξύ των ατμοσφαιρικών διαδικασιών, που εξελίσσονται στην περιοχή του υπό μελέτη αιολικού πάρκου, μέσω των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, με την παραγόμενη αιολική ισχύ. Για το λόγο αυτό προτιμήθηκε η χρήση νευρωνικών δικτύων για την πρόβλεψη και στην παρούσα διπλωματική.

Τα νευρωνικά δίκτυα αποτελούνται από κόμβους χωρισμένους σε επίπεδα, οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους μέσω των νευρώνων. Ένας κόμβος είναι, στην ουσία, μία συνάρτηση μεταφοράς, που λαμβάνει στην είσοδό της το πολωμένο γινόμενο ενός αριθμού, που ονομάζεται βάρος, με την έξοδο των κόμβων του προηγούμενου επιπέδου ή με μία εξωτερική είσοδο. Οι νευρώνες, καθένας από τους οποίους αποτελείται από ένα βάρος και μία πόλωση (ή κλίση), μοιράζονται όλη την πληροφορία που διέπει ένα σύστημα. Η ικανότητα ενός νευρωνικού δικτύου να προβλέπει, αποκτάται από ένα σύνολο εκπαίδευσης αρκετά μεγάλο,

ώστε να περιέχονται όλες οι περιπτώσεις που περιγράφουν το πρόβλημα και μέσω ενός αλγορίθμου εκμάθησης.

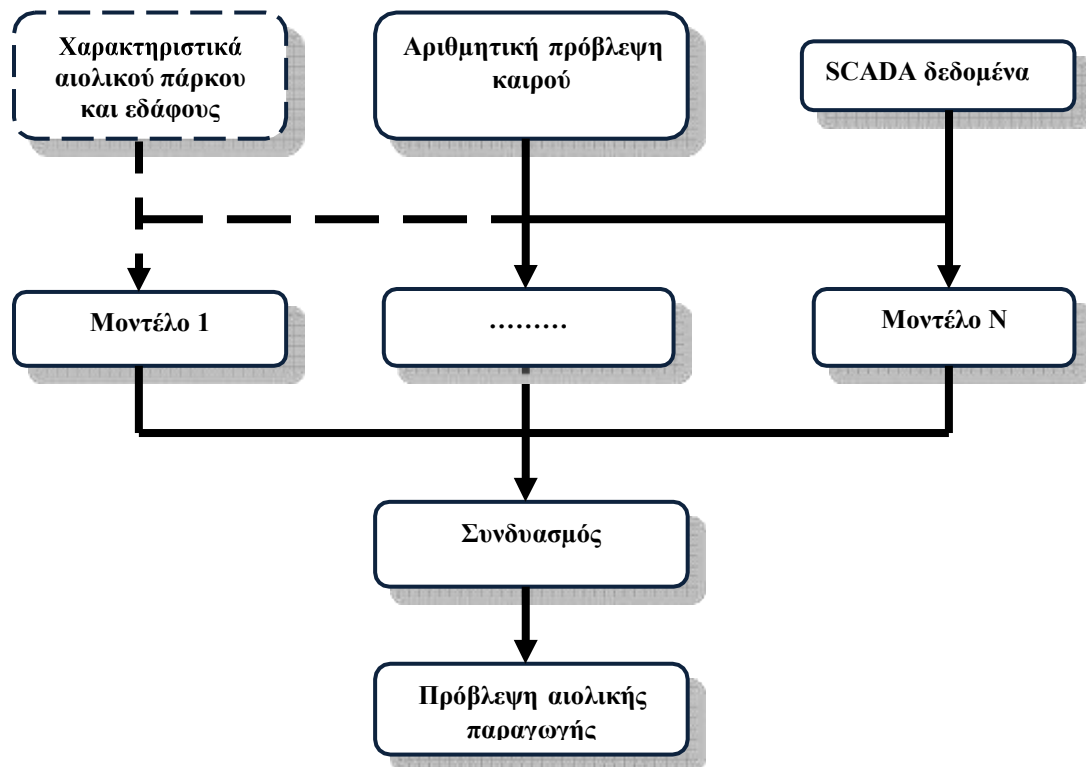
### **5.5 Συνδυασμός φυσικών και στατιστικών μοντέλων**

Οι πρόσφατες εξελίξεις στα συστήματα πρόβλεψης αιολικής ισχύος αφορούν μια συνδυαστική εκδοχή των δύο προσεγγίσεων, τα φυσικά και μαθηματικά μοντέλα. Το υβριδικό αυτό μοντέλο ωφελείται, από τη μία, από την υψηλή ακρίβεια των μοντέλων των χρονοσειρών σε βραχυπρόθεσμους ορίζοντες και, από την άλλη, από την ακρίβεια των φυσικών μοντέλων σε χρονικούς ορίζοντες από 6 μέχρι 72 ώρες. Το φυσικό μοντέλο επιτρέπει, επίσης, την αύξηση της χωρικής ανάλυσης των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, λαμβάνοντας υπ' όψιν τα χαρακτηριστικά της περιοχής και παράγοντας προβλέψεις χωρίς τη χρήση των μετρήσεων SCADA.

Δύο τύποι συνδυασμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το υβριδικό μοντέλο:

- Ένας συνδυασμός φυσικών και στατιστικών προσεγγίσεων (π.χ. Zephyr)
- Ένας συνδυασμός μοντέλων για την βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη (0-6 ώρες) και ένας συνδυασμός για την μακροπρόθεσμη (0-48 ώρες) .

Μια διαφορετική προσέγγιση είναι ο συνδυασμός εναλλακτικών στατιστικών μοντέλων, όπως το Ισπανικό Sipreolico (Spanish Sipreolico). Ο συνδυασμός επιτυγχάνεται είτε χρησιμοποιώντας τον ορίζοντα σαν κριτήριο, αφού πρώτα έχει επιλεγεί το μοντέλο που ταιριάζει καλύτερα εκτός λειτουργίας σε κάθε ορίζοντα, είτε με μια διαδικασία επιλογής βασιζόμενη στην πρόσφατη απόδοση κάθε μοντέλου ξεχωριστά.



Σχήμα 5.3: Διάγραμμα παρουσίασης σταδίων συνδυασμού στατιστικών προσεγγίσεων

## 5.6 Προβλέψεις τοπικού χαρακτήρα (αναβάθμιση)

Για να προβλέψει κάποιος την αιολική παραγωγή σε μια περιοχή ή μια χώρα, η πρώτη σκέψη είναι να προβλέψει την έξοδο κάθε αιολικού πάρκου και μετά να προσθέσει αυτές τις προβλέψεις. Η επιλογή αυτή λέγεται «ωμή βία (brute force)» διότι η πρόβλεψη των εξόδων κάθε αιολικού πάρκου σε μια περιοχή/χώρα μπορεί να είναι πολυδάπανη μέχρι και απαγορευτική, όσον αφορά την διαχείριση των δεδομένων και την υπολογιστική προσπάθεια που απαιτείται (ειδικά για την στατιστική προσέγγιση). Παράλληλα, πολλές από τις μετρήσεις SCADA (π.χ. ταχύτητα ανέμου, αιολική παραγωγή) όλων των αιολικών πάρκων, όπως επίσης και οι περιγραφές των πάρκων (καμπύλη ισχύος των τουρμπίνων, ονομαστική ισχύ, κλπ) μπορεί να είναι χαμηλής ποιότητας και πολλές φορές να λείπουν. Για παράδειγμα, οι πληροφορίες που μετρώνται σε κατάσταση λειτουργίας από τα συστήματα SCADA σε μερικές χώρες δεν είναι διαθέσιμες διότι είναι υποχρεωτικό να γίνει η εγκατάστασή τους μόνο σε μεγάλα αιολικά πάρκα. Επιπλέον, δεν είναι δυνατό για τους χειριστές των συστημάτων να έχουν να διαχειριστούν προβλέψεις για όλα τα αιολικά πάρκα στην περιοχή ευθύνης τους διότι τότε απαιτείται μεγάλο κόστος και μεγάλη υπολογιστική προσπάθεια.

Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι αναβάθμισης της πρόβλεψης της τοπικής/εθνικής αιολικής παραγωγής ενός δείγματος αναφοράς αιολικών

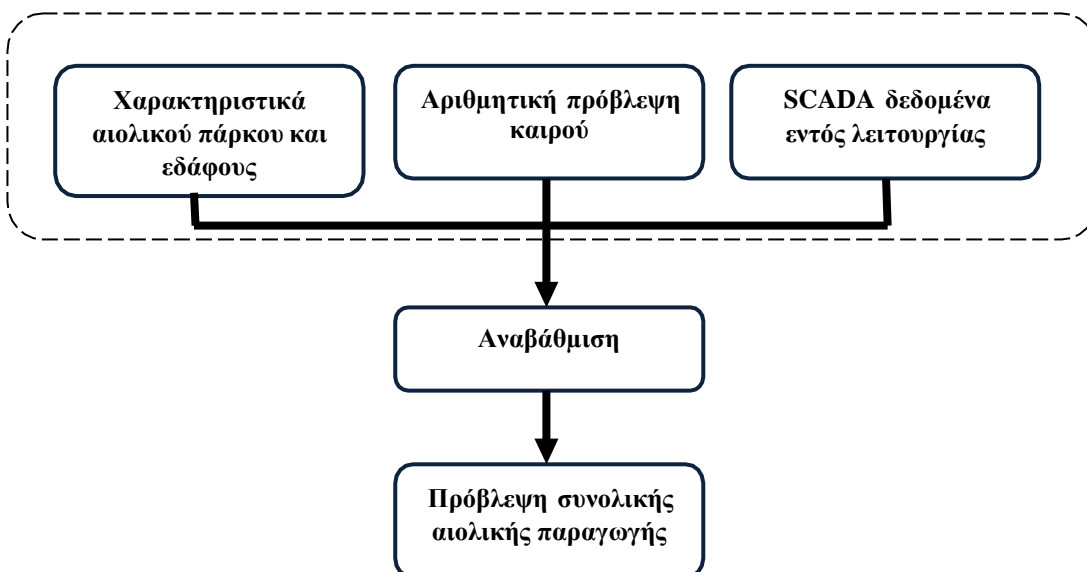


πάρκων. Παράλληλα, η ομαδοποίηση των αιολικών πάρκων παρουσιάζει μειωμένο σφάλμα πρόβλεψης ως αποτέλεσμα των φαινομένων των χωρικών ομαλοποιήσεων.

Ο σκοπός της αναβάθμισης είναι να υπολογιστεί κατά προσέγγιση η συνολική παραγόμενη αιολική ισχύς από προβλέψεις που διεξάγονται από έναν αντιπροσωπευτικό αριθμό αιολικών πάρκων, για τα οποία οι αριθμητικές καιρικές προβλέψεις και/ή οι μετρήσεις εντός λειτουργίας γίνονται διαθέσιμες από ένα σύστημα προβλέψεων.

## 5.7 Άμεση αναβάθμιση

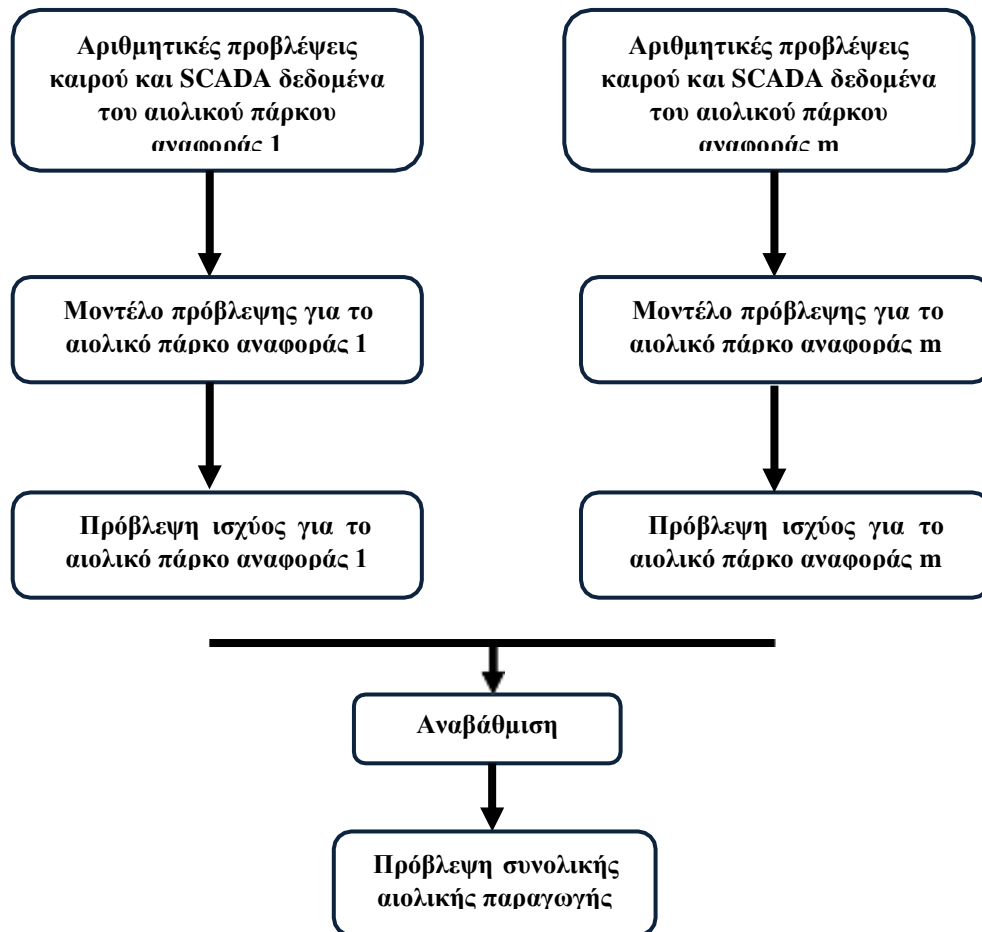
Η άμεση αναβάθμιση είναι μια απλή μέθοδος που συνδέει την παραγωγή και τα διαθέσιμα δεδομένα αριθμητικών καιρικών προβλέψεων, για ένα ή περισσότερα αιολικά πάρκα αναφοράς, με την τοπική παραγωγή, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Το μοντέλο αυτό αναβάθμισης έχει σχεδιαστεί και εκπαιδευτεί για να παράγει προβλέψεις για την τοπική αιολική ισχύ χρησιμοποιώντας κατευθείαν εισόδους από αυτά τα αιολικά πάρκα. Για τον λόγο αυτό, απαιτείται να υπάρχουν διαθέσιμα λεπτομερή δεδομένα της συνολικής παραγωγής έτσι ώστε να γίνεται εφικτός ο υπολογισμός των παραμέτρων του μοντέλου. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται ουσιαστικά στο στατιστικό μοντέλο και η κύρια δυσκολία του είναι ότι πρέπει η συνάρτηση να ενημερωθεί αν προστεθούν στο σύστημά μας νέα αιολικά πάρκα.



Σχήμα 5.4: Μέθοδος άμεσης αναβάθμισης

## 5.8 Διαδοχική προσέγγιση

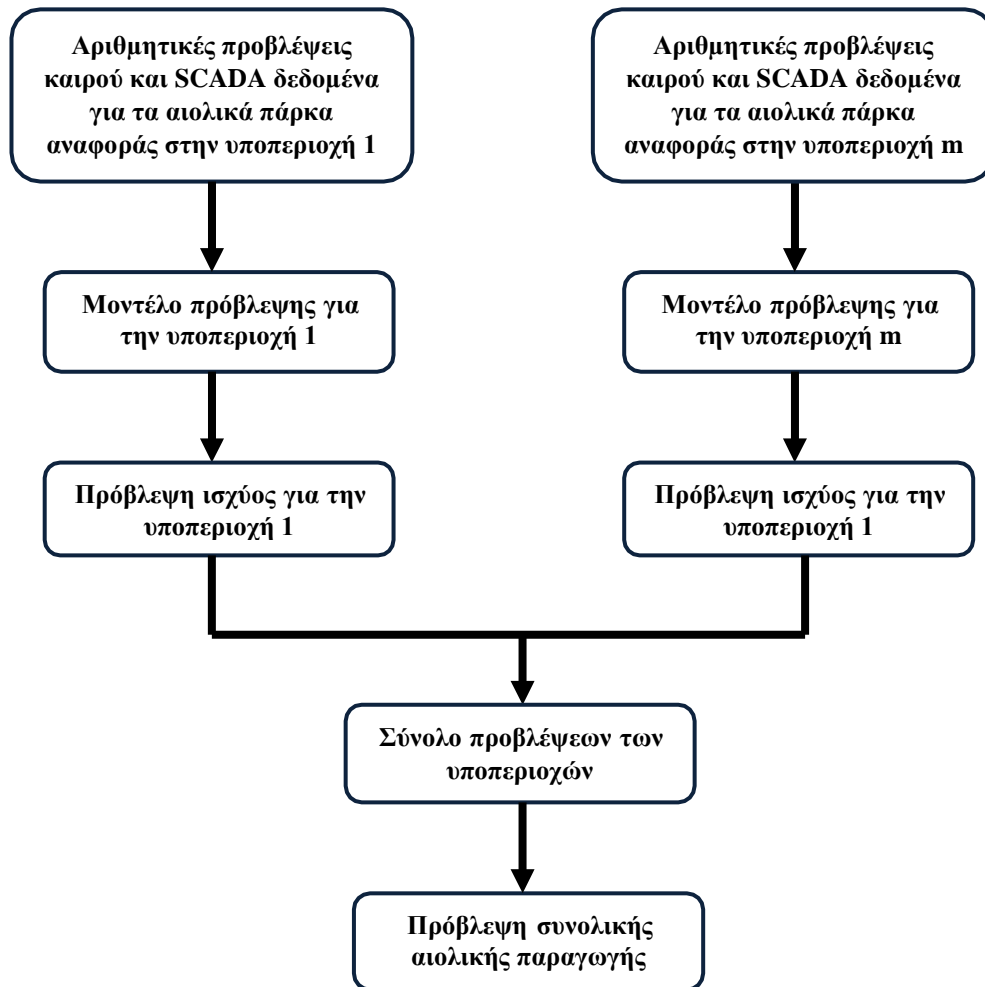
Η διαδοχική προσέγγιση είναι αυτή που κυρίως χρησιμοποιείται στις μέρες μας για αναβάθμιση. Αποτελείται από δύο στάδια πρόβλεψης: πρώτον, υπολογίζεται η παραγωγή αιολική ισχύος των αιολικών πάρκων αναφοράς και δεύτερον, το σύνολο τους υπολογίζει κατά προσέγγιση την συνολική τοπική/ εθνική παραγωγή, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.5.



Σχήμα 5.5: Διαδοχική μέθοδος για  $m$  αιολικά πάρκα αναφοράς

## 5.9 Προσέγγιση δέσμης ή υποπεριοχής

Αυτή η προσέγγιση βασίζεται στην συγκέντρωση των αιολικών πάρκων ανά συστάδες που περιέχουν γειτονικά μεταξύ τους αιολικά πάρκα ή πάρκα που ανήκουν στην ίδια υποπεριοχή και το μοντέλο που αναπτύσσεται για κάθε δέσμη ή υποπεριοχή λαμβάνει εισόδους από τα πάρκα αναφοράς που ανήκουν σε κάθε ομάδα. Τελικά, το σύνολο των προβλέψεων αιολικής παραγωγής της κάθε ομάδας μας δίνει και το τελικό αποτέλεσμα για ολόκληρη την περιοχή.



Σχήμα 5.6 Μέθοδος δέσμης ή υποπεριοχής για  $m$  υποπεριοχές

### 5.10 Εντός λειτουργίας Persistence για την αναβάθμιση των μοντέλων

Όπως αναφέρεται παραπάνω, η persistence είναι μια απλή μέθοδος σύμφωνα με την οποία «η παραγωγή αιολικής ισχύος στο μέλλον θα είναι ίδια με την παρούσα παραγωγή» και χρησιμοποιείται κυρίως για να αξιολογεί την απόδοση των προηγμένων μοντέλων. Στην πραγματικότητα, η επένδυση στην εφαρμογή μιας προηγμένης μεθόδου εντός λειτουργίας αξίζει μόνο αν το μοντέλο είναι ικανό να υπερνικήσει την persistence.

Όσον αφορά την αναβάθμιση, είναι κοινή πρακτική να θεωρείται ότι και «η συνολική αιολική παραγωγή του μέλλοντος θα είναι ίση με την σημερινή συνολική παραγωγή». Έχει αποδειχτεί ότι, βάσει του ορισμού, η persistence δεν μπορεί να είναι ένα μοντέλο για κατάσταση εντός λειτουργίας αν τα δεδομένα για όλα τα αιολικά πάρκα δεν είναι διαθέσιμα εντός λειτουργίας. Σε αυτή την περίπτωση, αξίζει μόνο η επένδυση σε μοντέλα εντός λειτουργίας που μπορούν να υπερνικήσουν μίας μέθοδο που μοιάζει με την persistence και βασίζεται σε δεδομένα

εντός λειτουργίας. Αυτή η μέθοδος, που ονομάζεται εντός λειτουργίας persistence, μπορεί να είναι το σύνολο της αιολικής παραγωγής των αντιπροσωπευτικών αιολικών πάρκων με SCADA συστήματα, προς την συνολική αιολική ισχύς (ονομαστικά μεγέθη).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ

---

### 6.1 Κριτήρια αξιολόγησης μοντέλων πρόβλεψης

Στο προηγούμενο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε μια περιγραφή των μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής και των μεθόδων που αυτά χρησιμοποιούν. Ωστόσο, κανένα μοντέλο δεν είναι σε θέση να αποδώσει την ακριβή τιμή της παραγόμενης αιολικής ισχύος για κάποια στιγμή στο μέλλον, καθώς για τη διαμόρφωση της τιμής αυτής υπεισέρχονται πολλές παράμετροι που δεν είναι καθόλου εύκολο να εκτιμηθούν επακριβώς. Έτσι, για την επιλογή του καλύτερου μοντέλου πρόβλεψης πρέπει να γίνει αξιολόγηση των σφαλμάτων που αυτά παρουσιάζουν κατά τη διαδικασία της πρόβλεψης.

Η σπουδαιότητα της επιλογής του κατάλληλου μοντέλου για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος έγκειται στο γεγονός ότι κατά την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος, η απόκλιση από τις πραγματικές τιμές συνεπάγεται οικονομικές απώλειες για του τελικούς χρήστες των προβλέψεων. Συνεπώς, η αποτίμηση των προβλέψεων είναι ύψιστης σημασίας μέρος της διαδικασίας της πρόβλεψης, όχι μόνο για τη διαμόρφωση πλήρους άποψης σχετικά με τη λειτουργία της επιλεγμένης προσέγγισης, αλλά επίσης και για την απόκτηση βαθύτερης διαορατικότητας σε ό,τι αφορά την αβεβαιότητα της πρόβλεψης.

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθεται ο ορισμός του σφάλματος της πρόβλεψης και στη συνέχεια παρουσιάζεται η μέθοδος αξιολόγησης των σημειακών και πιθανοτικών προβλέψεων. Κατά την παράθεση αυτή γίνεται αναφορά σε ένα σύνολο εκ των σημαντικότερων δεικτών σφάλματος που απασχολούν τη βιβλιογραφία των προβλέψεων και διακρίνοντάς τους σε συγκεκριμένες κατηγορίες, γίνεται μια προσπάθεια εντοπισμού των βασικών προτερημάτων και αδυναμιών του καθενός. Τέλος, πραγματοποιείται μια σύντομη αναφορά στις μεθόδους παρακολούθησης χρονοσειρών, οι οποίες έχουν ως σκοπό την εύρεση διαρθρωτικών ή άλλων απρόσμενων αλλαγών στο πρότυπο της χρονοσειράς των δεδομένων. Η εύρεση αυτή πρέπει να γίνεται αποτελεσματικά και όσο το δυνατόν πιο έγκυρα από τη χρονική στιγμή που θα συντελεστούν οι εν λόγω αλλαγές.

Για να αξιολογήσουμε μια μέθοδο πρόβλεψης πρέπει να θεσπίσουμε κάποια κριτήρια αξιολόγησης ώστε να βρεθεί εκείνο το μοντέλο, που με κατάλληλες παραμέτρους θα οδηγήσει στα πιο ακριβή αποτελέσματα. Τα κριτήρια αυτά βασίζονται στις τιμές των αποκλίσεων των προβλεπόμενων τιμών από τις αντίστοιχες πραγματικές τιμές της χρονοσειράς. Όσο πιο μικρές είναι οι αποκλίσεις αυτές, τόσο πιο καλή θεωρείται ότι είναι η μέθοδος πρόβλεψης που χρησιμοποιήθηκε, δεδομένου ότι είναι σε θέση να προσδιορίζει με σχετικά μεγάλη ακρίβεια τις τιμές της χρονοσειράς. Αντίθετα όσο περισσότερο απέχουν οι πραγματικές τιμές της χρονοσειράς από τις προβλεπόμενες, τόσο λιγότερο αξιόλογη είναι η χρησιμοποιούμενη μέθοδος πρόβλεψης. Αναμφισβήτητα, η αξιοπιστία των προβλέψεων εξαρτάται όχι μόνο από τη μέθοδο πρόβλεψης αλλά και από την “ποιότητα” και τον αριθμό των διαθέσιμων παρατηρήσεων της μεταβλητής.

Για μια μεταβλητή  $Y$ , η απόκλιση της προβλεπόμενης τιμής της  $\hat{Y}_t$  από την αντίστοιχη πραγματική τιμή της  $Y_t$  για την περίοδο  $t$ , όπου  $t=1,2,\dots,n$  ονομάζεται σφάλμα της πρόβλεψης (forecast error), συμβολίζεται με  $e_t$  και ορίζεται ως:

$$e_t = Y_t - \hat{Y}_t$$

Επομένως, για να προσδιορίσουμε την αξιοπιστία μιας συγκεκριμένης μεθόδου πρόβλεψης, θα πρέπει να μελετήσουμε τη διαχρονική συμπεριφορά των τιμών των σφαλμάτων της πρόβλεψης. Αυτό γίνεται με την εφαρμογή διάφορων κριτηρίων, σύμφωνα με τα οποία αξιολογούμε τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο πρόβλεψης. Κάθε ένα από τα κριτήρια αυτά ορίζεται από μια συγκεκριμένη συναρτησιακή σχέση των σφαλμάτων της πρόβλεψης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο για την αξιολόγηση μιας μεθόδου πρόβλεψης αλλά και για την επιλογή της “καλύτερης” μεταξύ δύο ή περισσότερων εναλλακτικών μεθόδων προβλέψεων.

### 6.1.1 Μέση απόλυτη απόκλιση (MAD)

Ένα απλό και εύκολο στη χρήση κριτήριο είναι η μέση απόλυτη απόκλιση MAD (Mean Absolute Deviation), το οποίο ορίζεται ως το άθροισμα των απόλυτων τιμών του σφάλματος της πρόβλεψης διαιρούμενο με τον αριθμό των περιόδων  $n$ , στις οποίες έγιναν προβλέψεις δηλαδή:

$$MAD = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |Y_t - \hat{Y}_t| = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |e_t|$$

Το MAD εκφράζει τη μέση τιμή των απόλυτων αποκλίσεων των προβλεπόμενων τιμών της χρονοσειράς από τις αντίστοιχες πραγματικές και έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά. Πρώτον, η μονάδα μέτρησής του είναι η ίδια με εκείνη των τιμών της χρονοσειράς και έτσι είναι εύκολη η ερμηνεία του. Δεύτερον, στον υπολογισμό του λαμβάνονται υπ’όψιν μόνο οι απόλυτες τιμές των σφαλμάτων και όχι οι πραγματικές τιμές τους. Αυτό σημαίνει ότι το MAD είναι ανεξάρτητο από θετικές και αρνητικές τιμές του σφάλματος, δηλαδή είναι ανεξάρτητο από το αν οι τιμές των προβλέψεων είναι μικρότερες (υποεκτίμηση) ή μεγαλύτερες (υπερεκτίμηση) των πραγματικών τιμών. Τρίτον, το MAD βασίζεται στην υπόθεση ότι η σοβαρότητα του σφάλματος ή το κόστος που δημιουργείται από το σφάλμα της πρόβλεψης σχετίζεται γραμμικά με το μέγεθος του σφάλματος. Έτσι, το κόστος από τα σφάλματα της πρόβλεψης είναι το ίδιο, άσχετα αν προέρχεται από λίγα μεγάλα σφάλματα ή πολλά μικρά που έχουν το ίδιο συνολικό άθροισμα απόλυτων τιμών.



### 6.1.2 Μέσο σφάλμα τετραγώνου (MSE)

Ένα από τα κριτήρια που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των μεθόδων πρόβλεψης είναι το μέσο σφάλμα τετραγώνου MSE (Mean Squared Error), το οποίο ορίζεται ως το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων διαιρούμενο με τον αριθμό των χρονικών περιόδων  $n$ , στις οποίες έγιναν οι προβλέψεις, δηλαδή:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Y_t - \hat{Y}_t)^2 = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n e_t^2$$

Το MSE είναι η μέση τιμή των τετραγώνων των αποκλίσεων των προβλεπόμενων τιμών της χρονοσειράς από τις αντίστοιχες πραγματικές και έχει τα εξής χαρακτηριστικά. Πρώτον, η μονάδα μέτρησής του είναι εκφρασμένη στη μονάδα μέτρησης των τιμών των παρατηρήσεων υψωμένη όμως στο τετράγωνο. Για το λόγο αυτό, η ερμηνεία του MSE δεν είναι εύκολα κατανοητή. Έτσι, χρησιμοποιούμε τη θετική τιμή της τετραγωνικής του ρίζας, που ονομάζεται τετραγωνική ρίζα μέσου σφάλματος τετραγώνου RMSE (Root Mean Squared Error), δηλαδή είναι:

$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n e_t^2}$$

Και εκφράζεται στην ίδια μονάδα μέτρησης με εκείνη των τιμών της χρονοσειράς. Η σχέση μεταξύ των κριτηρίων RMSE και MSE είναι ανάλογη με τη σχέση μεταξύ τυπικής απόκλισης και διακύμανσης. Δεύτερον, ο τρόπος υπολογισμού του κριτηρίου MSE δίνει πολύ μεγαλύτερη βαρύτητα στις μεγάλες τιμές των σφαλμάτων της πρόβλεψης, από ότι στις μικρές.

### 6.1.3 Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα (MAPE)

Σε αντίθεση με το MAD και το MSE, το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα MAPE (Mean Absolute Percentage Error) εξετάζει τη συμπεριφορά της απόλυτης τιμής του σφάλματος της πρόβλεψης σε σχέση με την πραγματική τιμή της χρονοσειράς. Το MAPE ορίζεται ως το άθροισμα των απόλυτων τιμών των σφαλμάτων της πρόβλεψης προς τις αντίστοιχες πραγματικές τιμές της χρονοσειράς διαιρούμενο με τον αριθμό των χρονικών περιόδων  $n$ , στις οποίες έγιναν προβλέψεις, δηλαδή:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|Y_t - \hat{Y}_t|}{Y_t} \times 100\% = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|e_t|}{Y_t} \times 100\%$$

Το MAPE, ως κριτήριο αξιολόγησης προβλέψεων, δείχνει πόσο μεγάλο είναι το σφάλμα της πρόβλεψης σε σχέση με τις πραγματικές τιμές της χρονοσειράς. Έτσι, όσο μικρότερη είναι η τιμή του, τόσο πιο καλή είναι η μέθοδος πρόβλεψης. Το κριτήριο αυτό, επειδή είναι απαλλαγμένο από μονάδες μέτρησης, το χρησιμοποιούμε και για να συγκρίνουμε την

ακρίβεια μιας ή και περισσότερων μεθόδων προβλέψεων και για περισσότερες από μια χρονοσειρές.

#### 6.1.4 Μέσο ποσοστιαίο σφάλμα (MPE)

Όταν ενδιαφερόμαστε να προσδιορίσουμε αν η μέθοδος πρόβλεψης είναι μεροληπτική, δηλαδή αν οι προβλεπόμενες τιμές είναι συστηματικά μεγαλύτερες ή μικρότερες από τις αντίστοιχες πραγματικές, τότε μπορούμε να εφαρμόσουμε το μέσο ποσοστιαίο σφάλμα MPE (Mean Percentage Error). Το κριτήριο αυτό υπολογίζεται όπως και το κριτήριο MAPE, μόνο που χρησιμοποιούνται οι πραγματικές κα όχι οι απόλυτες τιμές του σφάλματος της πρόβλεψης, δηλαδή:

$$MPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{Y_t - \hat{Y}_t}{Y_t} \times 100\% = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{e_t}{Y_t} \times 100\%$$

Αναμφισβήτητα, όσο πιο κοντά στο μηδέν είναι η τιμή του MPE, τόσο πιο αμερόληπτη και καλή είναι η μέθοδος πρόβλεψης που χρησιμοποιήθηκε. Αντίθετα, μεγάλες απόλυτες τιμές του MPE φανερώνουν μεγάλη μεροληψία της μεθόδου. Ειδικότερα, μεγάλη αρνητική τιμή του MPE σημαίνει ότι η μέθοδος πρόβλεψης παρέχει συστηματικά υπερεκτιμημένες προβλέψεις σε σχέση με τις πραγματικές τιμές, ενώ μεγάλη θετική τιμή του MPE δηλώνει υποεκτίμηση των τιμών της χρονοσειράς.

#### 6.1.5 Κανονικοποιημένα μοντέλα (normalized scores)

Πολύ συχνά παρουσιάζεται η ανάγκη σύγκρισης της ακρίβειας στην πρόβλεψη ανταγωνιστικών τεχνικών σε αιολικά πάρκα διαφορετικού όμως μεγέθους. Για να καθίσταται δυνατή η σύγκριση των μεθόδων πρόβλεψης σε διαφορετικά πάρκα θεωρούμε τα κανονικοποιημένα λάθη πρόβλεψης εκφρασμένα ως κλάσμα της εγκατεστημένης χωρητικότητας. Διαιρούμε δηλαδή τους προαναφερθέντες δείκτες με τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ του πάρκου κι έτσι αυτοί μπορούν πλέον να συγκριθούν.

## 6.2 Χρονοσειρές

### 6.2.1 Έννοια της Χρονοσειράς

Οι χρονοσειρές αποτελούν ένα σύνολο διαδοχικών παρατηρήσεων της τιμής κάποιου φυσικού ή άλλου μεγέθους ανηγμένες στο χρόνο. Οι χρονοσειρές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τον τρόπο προσδιορισμού των μελλοντικών τιμών τους, σε ντετερμινιστικές και στοχαστικές χρονοσειρές αντίστοιχα. Όταν οι διαδοχικές παρατηρήσεις δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και οι μελλοντικές τιμές μπορούν να προσδιοριστούν ακριβώς από τις προηγούμενες, τότε αυτές οι χρονοσειρές είναι ντετερμινιστικές. Ωστόσο,

κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει με τις πραγματικές χρονοσειρές, καθώς το μέλλον καθορίζεται μερικώς από το παρελθόν. Αυτό συμβαίνει διότι στον πραγματικό κόσμο οι χρονοσειρές, δεν περιγράφουν την διαχρονική εξέλιξη κάποιου φυσικού μεγέθους, για το οποίο υπάρχει πλήρης γνώση όλων των παραγόντων που το επηρεάζουν, αλλά αντιθέτως επηρεάζονται από τον λεγόμενο «τυχαίο παράγοντα», ο οποίος αντιπροσωπεύει μία στατιστική μεταβλητή.

Ωστόσο, ο διαχωρισμός των χρονοσειρών σύμφωνα με την παραπάνω κατηγοριοποίηση δεν είναι τόσο εύκολος και προφανής. Παρόλα αυτά, θα πρέπει να γίνει η κατηγοριοποίηση ώστε να γίνεται πιο εύκολα η αναγνώριση και η κατανόηση των παραμέτρων που παίζουν ρόλο στη χρονική εξέλιξη της χρονοσειράς ανεξαρτήτως των δεδομένων της.

### 6.2.2 Ποιοτικά Χαρακτηριστικά της Χρονοσειράς

Οι χρονοσειρές δομούνται από κάποια βασικά χαρακτηριστικά, όπου με τις κατάλληλες τεχνικές μπορούν να αναλυθούν σε αυτά. Οι παραδοσιακές μέθοδοι ανάλυσης χρονοσειρών ασχολούνται με την αποσύνθεση της χρονοσειράς σε τέσσερα βασικά της στοιχεία: την τάση, την κυκλικότητα, την εποχιακότητα και τις μη κανονικές διακυμάνσεις. Αυτή η προσέγγιση είναι χρήσιμη όχι μόνο για την εφαρμογή της κλασικής μεθόδου αποσύνθεσης, αλλά και για την περαιτέρω ανάλυση των ποιοτικών χαρακτηριστικών της χρονοσειράς, ανεξαρτήτως της μεθόδου πρόβλεψης που θα χρησιμοποιηθεί.

Αρχικά, η **τάση** ορίζεται σαν μία «μακροπρόθεσμη» μεταβολή του μέσου επιπέδου τιμών της χρονοσειράς. Βέβαια, ενώ αυτός ο όρος είναι κοινά αποδεκτός, υπάρχει ένα πρόβλημα σχετικά με την αποσαφήνιση του ποια μεταβολή θεωρείται μακροπρόθεσμη. Για παράδειγμα βλέπουμε ότι οι περιβαλλοντολογικές και κλιματικές μεταβλητές εμφανίζουν μία κυκλική διακύμανση 50 ετών. Επομένως, αν κάποιος διαθέτει στοιχεία για τα πρώτα 20 έτη θα θεωρούσε την παρατηρούμενη αύξηση του μέσου επιπέδου σαν τάση, ενώ αν εξέταζε δεδομένα μερικών εκατοντάδων ετών θα συμπεραίνε πως πρόκειται, για κυκλική διακύμανση. Άρα, για να μπορέσει κανείς να διαπιστώσει την τάση θα πρέπει να έχει στην διάθεσή του έναν ικανό αριθμό παρατηρήσεων και ταυτόχρονα να εκτιμήσει το κατάλληλο μήκος της περιόδου μέσα στην οποία θα αναζητήσει την ύπαρξη της.

Η **κυκλικότητα** είναι το δεύτερο συστατικό μίας χρονοσειράς και αντιπροσωπεύει μια κυματοειδή μεταβολή που οφείλεται σε ειδικές εξωγενείς συνθήκες και εμφανίζεται κατά περιόδους, οι οποίες δεν είναι σταθερές και είναι συνήθως είναι μεγαλύτερες του ενός έτους. Κυκλικότητα εμφανίζουν οι χρονοσειρές, κατά κύριο λόγο των περισσότερων οικονομικών μεγεθών όπως για παράδειγμα του Ακαθάριστου Εγχώριου Προϊόντος, των τιμών των μετοχών και των τιμών του πετρελαίου. Αυτές οι κυκλικές μεταβολές οφείλονται στις γενικότερες οικονομικές συνθήκες που επικρατούν και που χαρακτηρίζονται από περιόδους με διαδοχικές ανόδους και υφέσεις και είναι γνωστές με την ονομασία επιχειρηματικός κύκλος.

Η **εποχικότητα** είναι μία περιοδική διακύμανση που έχει σταθερό μήκος και μικρότερο του έτους μήκος. Η εποχιακότητα μπορεί εύκολα να αναγνωριστεί παρατηρώντας την γραφική της αναπαράσταση. Επειδή οι αλλαγές που προκαλεί στα δεδομένα της χρονοσειράς είναι

σταθερές με την πάροδο του χρόνου, είναι εύκολο να αντιμετωπίσουμε την επίδρασή της. Αυτό συμβαίνει με την εύρεση των δεικτών εποχιακότητας για τα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα, όπου με την διαίρεση αυτών των δεικτών με τα πραγματικά δεδομένα παίρνουμε την λεγόμενη αποεποχικοποιημένη χρονοσειρά, η οποία είναι απαλλαγμένη από την επίδραση της εποχιακότητας. Ένα πολύ χαρακτηριστικό παράδειγμα εποχιακής χρονοσειράς είναι οι πωλήσεις παγωτών που εμφανίζουν μία έντονη άνοδο τους καλοκαιρινούς μήνες και οι πωλήσεις καυσίμων τους χειμερινούς.

Ως **ασυνέχειες** ορίζονται οι απομονωμένες παρατηρήσεις που εμφανίζονται στη γραφική αναπαράσταση κάποιας χρονοσειράς ως απότομες αλλαγές στο πρότυπο συμπεριφοράς της. Τέτοιες αλλαγές έχουν είτε παροδικό είτε μόνιμο χαρακτήρα. Αυτές που έχουν παροδικό χαρακτήρα και που η επίδρασή τους στη χρονοσειρά έχει μικρή χρονική διάρκεια ονομάζονται outliers ή special events. Πρέπει να τονιστεί εδώ πως η αναγνώρισή τους είναι δύσκολη και απαιτεί και θεωρητική γνώση, αλλά και κριτική ικανότητα. Ένα outlier αποτελεί μία ασυνήθιστη παρατήρηση που οφείλεται σε κάποιο εξαιρετικό ή απρόβλεπτο γεγονός. Για παράδειγμα, μία απεργία μπορεί να προκαλέσει δραματική πτώση στη παραγωγική διαδικασία, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα μία μικρή πτώση στο γράφημα παραγόμενων προϊόντων της εταιρείας.

Στον αντίποδα, οι αλλαγές με μόνιμο χαρακτήρα ονομάζονται level-shifts αφού εμφανίζονται ως απότομες αλλαγές στο μέσο επίπεδο των τιμών της χρονοσειράς. Ένα παράδειγμα τέτοιας μόνιμης αλλαγής είναι η πτώση των πωλήσεων μίας εταιρίας εξαιτίας της εισόδου στην αγορά μίας ανταγωνίστριας εταιρείας. Με αυτές τις συνθήκες θα υπάρξει μία απότομη μείωση του μέσου επιπέδου τιμών, το οποίο θα σταθεροποιηθεί σε ένα πιο χαμηλό σημείο.

**Μη κανονικές διακυμάνσεις** θεωρούνται εκείνες που απομένουν όταν έχουν απομονωθεί όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της χρονοσειράς. Οι διακυμάνσεις αυτές αντιπροσωπεύουν μία τυχαία μεταβλητή που εκφράζει τον τυχαίο παράγοντα μιας στοχαστικής διαδικασίας. Επίσης μπορεί να αντιπροσωπεύουν κάποια ασυνέχεια που συνδέεται με κάποιο εξαιρετικό γεγονός.

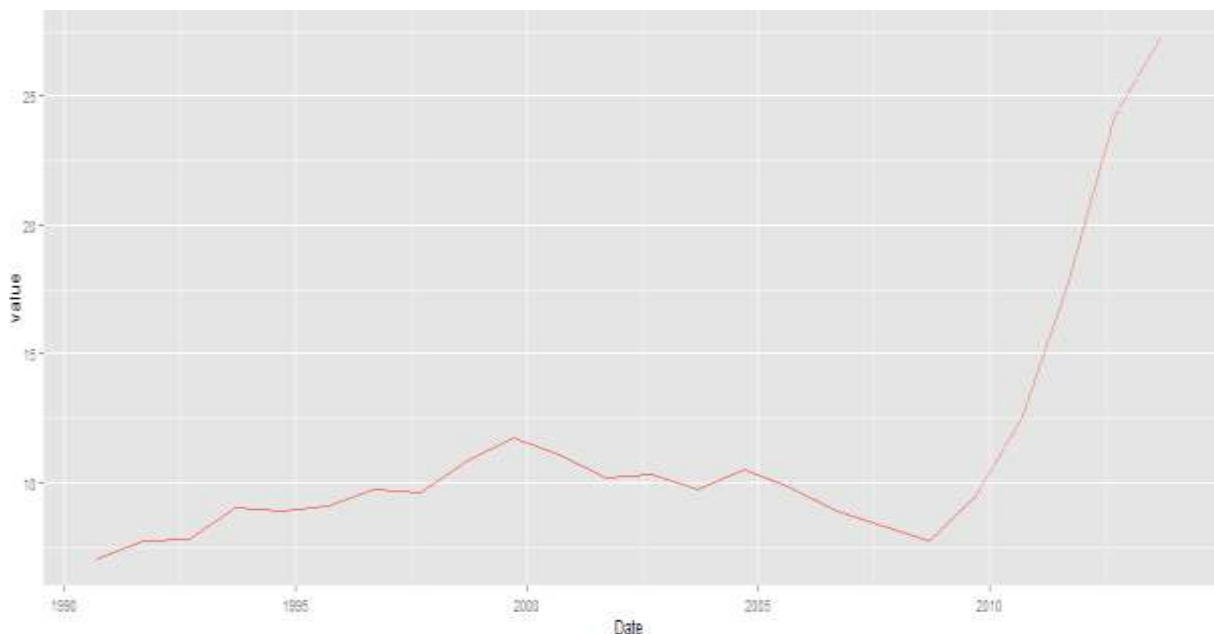
Τέλος, θα πρέπει να τονιστεί πως η οπτικοποίηση των δεδομένων είναι πολύ σημαντική για την ευκολότερη εύρεση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των χρονοσειρών, όπως φαίνεται στα παρακάτω παραδείγματα.

### 6.2.3 Αναπαράσταση Χρονοσειρών

Η χρονοσειρά δεν είναι τίποτα παραπάνω από μία σειρά παρελθουσών τιμών για την περιγραφή ενός μεγέθους. Η γραφική αναπαράσταση των δεδομένων αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο που βοηθάει στην ανάλυση της χρονοσειράς, αλλά και τη διαδικασία της πρόβλεψης. Από την αναπαράσταση των δεδομένων γίνονται πιο εμφανή τα βασικά στοιχεία της χρονοσειράς, κάτι το οποίο βοηθάει τον αναλυτή στην επιλογή της κατάλληλης μεθοδολογίας και εργαλείων με σκοπό να έχει τα βέλτιστα αποτελέσματα με το μικρότερο σφάλμα. Επίσης, με το γράφημα μπορεί να γίνει εύκολα ο εντοπισμός ακραίων εσφαλμένων τιμών, και έτσι ο αναλυτής μπορεί κάνοντας τις κατάλληλες κινήσεις να διορθώσει τις εσφαλμένες τιμές.

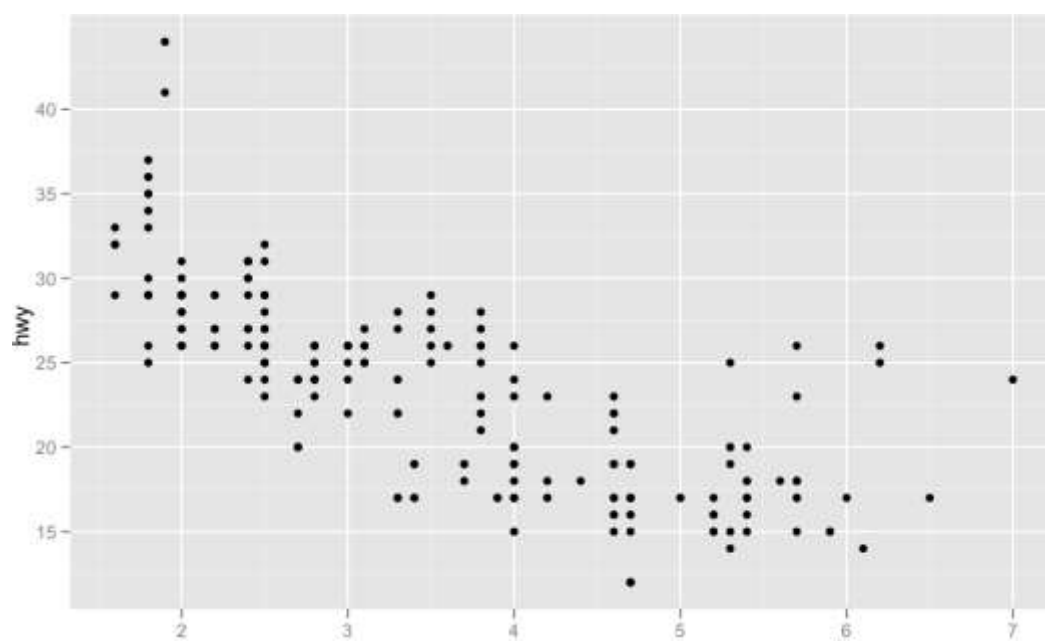
Η αναπαράσταση ουσιαστικά έγκειται σε δισδιάστατη γραφική απεικόνιση των πραγματικών τιμών των διαθέσιμων ιστορικών δεδομένων ως προς το χρόνο. Οι κύριοι τύποι γραφημάτων που χρησιμοποιούνται είναι:

- **Διαγράμματα Χρόνου (time plots):** Είναι το πιο χρησιμοποιούμενο διάγραμμα και αναπαριστά τα διαθέσιμα ιστορικά δεδομένα στην πάροδο του χρόνου. Με την χρησιμοποίηση αυτών των διαγραμμάτων είναι πολύ πιο εύκολο να αντιληφθούμε τα βασικά χαρακτηριστικά των χρονοσειρών. Λόγω της ευκολίας της κατανόησης του συγκεκριμένου είδους γραφήματος από την πλειοψηφία του κόσμου, οδήγησε στην χρησιμοποίηση αυτού του τύπου γραφήματος για την απεικόνιση των δεδομένων στην εφαρμογή που κατασκευάστηκε.



Σχήμα 6.1: Διάγραμμα χρόνου

- **Εποχιακά Διαγράμματα (seasonal plots):** Αυτά τα διαγράμματα χρησιμοποιούνται για χρονοσειρές που παρουσιάζουν έντονη εποχιακότητα.
- **Διαγράμματα Διασποράς (scatter plots):** Το διάγραμμα διασποράς είναι το κατάλληλο γράφημα που δημιουργούμε ως πρώτο βήμα για να μελετήσουμε τη σχέση που υπάρχει μεταξύ δύο συνεχών αριθμητικών μεταβλητών, ιδιαίτερα αν αποσκοπούμε στη δημιουργία μοντέλου πρόγνωσης των τιμών της μίας μεταβλητής από την άλλη. Με το διάγραμμα διασποράς και μια έμπειρη στατιστική ματιά ανιχνεύεται η σχέση που ενδεχομένως να υπάρχει μεταξύ των δύο μεταβλητών.



Σχήμα 6.2: Διάγραμμα διασποράς



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

---

### 7.1 Ερευνητικές μέθοδοι και τεχνικές πρόβλεψης αιολικής ισχύος

#### 7.1.1 Πολύ βραχυπρόθεσμες προβλέψεις

##### 7.1.1.1 Πρόβλεψη αιολικής ταχύτητας με στατιστικές μεθόδους

Αυτή η προσέγγιση αφορά μόνο προβλέψεις της ταχύτητας του ανέμου αλλά συχνά οι προβλέψεις της αιολικής ταχύτητας μετατρέπονται σε προβλέψεις ισχύος μέσω μιας εμπειρικής καμπύλης ισχύος ή την καμπύλη ισχύος του κατασκευαστή.

Το πρώτο μοντέλο πρόβλεψης, που χρησιμοποιήθηκε κυρίως για την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος, κάνει χρήση φίλτρου Kalman, το οποίο χρησιμοποιεί τις έξι τελευταίες μετρήσεις ως εισόδους, προβλέπει την ταχύτητα του ανέμου για τα λεπτά που ακολουθούν. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν θεωρούνται καλά όταν συγκρίνονται με την persistence για χρονικούς ορίζοντες κάτω των 10 λεπτών για μέσα δεδομένα. Η βελτίωση είναι μικρή για χρονικώς μεγάλα μέσα και ανύπαρκτη για ωριαία μέσα.

Για τα μοντέλα που βασίζονται στην μεθοδολογία Box-Jenkins, η μέθοδος του γενικού αυτό-παλινδρομικού ολοκληρωμένου κινητού μέσου (ARIMA) ήταν η πρώτη που χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη της αιολικής ταχύτητας. Για παράδειγμα, οι Κονταξής και Καμπούρης χρησιμοποίησαν ένα αυτό-παλινδρομούμενο μοντέλο για να προβλέψουν την ταχύτητα του ανέμου για χρονικούς ορίζοντες μεταξύ 30 λεπτών και 5 ωρών και χρησιμοποίησαν μετά αυτές τις τιμές για να ελέγξουν ένα απομονωμένο υβριδικό diesel/αιολικό σύστημα και για να προγραμματίσουν την βραχυπρόθεσμη λειτουργία του. Ομοίως, οι Kamal και Jafri χρησιμοποίησαν ένα ARIMA μοντέλο για να προβλέψουν την αιολική ταχύτητα και να υπολογίσουν τα διαστήματα εμπιστοσύνης, οι Schlink και Tetzlaff τα χρησιμοποίησαν για να προβλέψουν την ταχύτητα για τα επόμενα 10 λεπτά σε ένα αεροδρόμιο, οι Poggi et al. προέβλεψαν την αιολική ταχύτητα για τις επόμενες 3 ώρες για κάθε μήνα και τέλος οι Torres et al. χρησιμοποίησαν ARMA μοντέλα για να προβλέψουν τις ωριαίες μέσες ταχύτητες για χρονικούς ορίζοντες των 10 ωρών σε πέντε διαφορετικές τοποθεσίες με διαφορετικά τοπογραφικά χαρακτηριστικά. Με αυτό το μοντέλο, για πάνω από εννιά χρόνια ήταν δυνατό να επιτευχθεί μια μείωση στο σφάλμα της τάξης του 20% συγκριτικά με την persistence και ο Tantareanu απέδειξε ότι τα μοντέλα ARMA μπορούν να αποδώσουν μέχρι και 30% καλύτερα από την persistence για 3 με 10 χρονικά βήματα μπροστά με δειγματικά δεδομένα των 2.5 Hz.

Εναλλακτικές μέθοδοι πρόβλεψης βασίζονται σε **τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης**, όπως τα νευρωνικά δίκτυα (Neural networks, NNs), μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης (Support Vector Machines, SVMs) ή συστήματα ασαφούς λογικής (Fuzzy inference Systems, FISs).

Οι Αλεξιάδης et al. πρότειναν ένα μοντέλο, που βασίζεται στα νευρωνικά δίκτυα, για την πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου στο νησί της Σύρου, χρησιμοποιώντας ιστορικά δεδομένα ανέμων από το νησί και από άλλα γειτονικά νησιά ως μεταβλητές εισόδου. Τα αποτελέσματα έδειξαν μια βελτίωση 32% στο σφάλμα πρόβλεψης για χρονικό ορίζοντα 1 ώρας και βελτίωση 27% για χρονικό ορίζοντα 2 ωρών όταν χρησιμοποιήθηκε η ίδια μέθοδος σε διαφορετική τοποθεσία στην Ελλάδα.

Ο Σφέτσος αξιολογεί μια σειρά από διαφορετικές μεθόδους: ένα μοντέλο persistence, ένα μοντέλο ARIMA, νευρωνικά δίκτυα και συστήματα νεύρο-ασαφούς λογικής. Το μοντέλο με τα καλύτερα αποτελέσματα ήταν το νευρωνικό δίκτυο, έχοντας μέση βελτίωση 20-40% σε σχέση με την persistence. Σε πιο πρόσφατες έρευνες, χρησιμοποιεί δύο μοντέλα που βασίζονται στα νευρωνικά δίκτυα για να προβλέψει την αιολική ταχύτητα για χρονικό ορίζοντα μία ώρα. Το πρώτο μοντέλο χρησιμοποιεί ανέμου ως είσοδο τις τελευταίες γνωστές τιμές της ωριαίας ταχύτητας του και τα αποτελέσματα είναι μόνο 3% καλύτερα από εκείνα που καταγράφηκαν για τα μοντέλα persistence. Το δεύτερο μοντέλο, πάλι, χρησιμοποιεί ως είσοδο την χρονοσειρά της αιολικής ταχύτητας με διαστήματα 10 λεπτών, χρησιμοποιώντας επιπλέον την έξοδο του νευρωνικού δικτύου κατ' επανάληψη για να υπολογίσει τα επόμενα 60 λεπτά. Η βελτίωση αυτή τη φορά είναι 10% πάνω από την persistence.

Οι Ramirez-Rosado και Fernández-Jiménez παρουσίασαν ένα μοντέλο τριών φάσεων:

1. Υπολογίζεται ο μετασχηματισμός Fourier των τελευταίων 24 τιμών της μέσης ταχύτητας του ανέμου.
2. 23 συστήματα ασαφούς λογικής (Takagi-Sugeno) προβλέπουν τους συντελεστές του μετασχηματισμού Fourier για την ακόλουθη ώρα.
3. Προβλέπεται η μέση αιολική ταχύτητα για την ακόλουθη ώρα βασιζόμενη στους προβλεπόμενους συντελεστές του βήματος δύο.

#### **7.1.1.2 Προβλέψεις αιολικής ισχύος**

Μια άλλη περίπτωση των βραχυπρόθεσμων προβλέψεων είναι η άμεση πρόβλεψη της αιολικής ισχύος, χωρίς την χρήση βημάτων κατά τα οποία προβλέπεται η ταχύτητα του ανέμου.

Οι Καρινιωτάκης et al. δοκίμασαν διάφορες μεθόδους πρόβλεψης για το νησί της Κρήτης: προσαρμοζόμενα γραμμικά μοντέλα, προσαρμοζόμενα μοντέλα ασαφούς λογικής και μοντέλα βασισμένα σε μεθόδους κυματιδίων (wavelet).

Οι Ramirez-Rosado και Fernández-Jiménez χρησιμοποίησαν ασαφείς χρονοσειρές για να προβλέψουν την αιολική παραγωγή για ορίζοντα 24 ωρών. Οι ασαφείς χρονοσειρές συνδυάστηκαν με ασαφείς γλωσσικές πληροφορίες για τον άνεμο, όπως «δυνατός άνεμος», που επιτρέπουν στην μέθοδο πρόβλεψης να καταγράψει μια βελτίωση 14.3%. Ενώ οι ίδιοι σε άλλη στιγμή παρουσίασαν ένα μοντέλο που βασίζεται στην ομαδοποίηση ιστορικών δεδομένων χρησιμοποιώντας μια αφαιρετική μέθοδο ομαδοποίησης. Για κάθε ομάδα, χρησιμοποιείται ένα γραμμικό παλινδρομικό μοντέλο για να προβλέψει την αιολική

παραγωγή και η τιμή αυτή αποτελεί τον σταθμισμένο μέσο όλων των τιμών που αποκτήθηκαν από κάθε γραμμικό μοντέλο. Ο χρονικός ορίζοντας ορίζεται στις 6 ώρες και η βελτίωση σε σχέση με την persistence είναι περίπου 14%.

Ο πρότυπος αλγόριθμος πρόβλεψης CAISO (California Independent System Operator) για τις βραχυπρόθεσμες προβλέψεις, χρησιμοποιεί ένα τροποποιημένο μοντέλο ARIMA για να υπολογίσει τον συντελεστή ανάπτυξης/πτώσης για 2.5 ώρες μπροστά. Οι συντελεστές του μοντέλου προσαρμόζονται κατά την λειτουργία και με την εισαγωγή ενός επιπλέον όρου στο τροποποιημένο μοντέλο και συμπεριλήφθηκε ένα πλαίσιο αυτό-αντιστάθμισης. Το μοντέλο παρουσιάζει καλά αποτελέσματα τις πρώτες δύο ώρες, όπου το MAE είναι κάτω από 3% και 8% αντίστοιχα της μέγιστης παρατηρούμενης παραγωγής. Οι συγγραφείς τόνισαν ιδιαίτερος την ανάγκη να συμπεριληφθούν αριθμητικές προβλέψεις καιρού και πληροφορίες της κατάστασης της μονάδος, στο μοντέλο. Παρόλα αυτά οι Milligan et al. διεξήγαγαν έρευνα για να κατανοήσουν σε ποιο βαθμό η ανάλυση των χρονοσειρών μπορεί να βελτιώσει τις απλές προβλέψεις persistence, όπως επίσης και την χρησιμότητά τους στις αγορές μίας ώρας μπροστά. Τα μοντέλα ARIMA για την αιολική ταχύτητα και την αιολική ισχύ δοκιμάζονται για διαφορετικές παραμέτρους. Το συμπέρασμα τελικά είναι ότι η χωρητικότητα των μοντέλων πρόβλεψης ARIMA διέφεραν όταν εφαρμόζονταν σε διαφορετικές χρονικές περιόδους και οι συγγραφείς πρότειναν την χρησιμοποίηση ενός ενιαίου μοντέλου αντί για ένα μόνο μοντέλο.

Η παραγωγή αιολικής ισχύος κοντά σε παραλία παρουσιάζει ομαλοποιημένες αυξομειώσεις ισχύος διότι τα αιολικά πάρκα απλώνονται συνήθως σε μεγάλη περιοχή. Αυτή η ομαλοποίηση στα off-shore αιολικά πάρκα δεν είναι συνηθισμένες διότι οι ανεμογεννήτριες συγκεντρώνονται σε μία μόνο περιοχή και, συνεπώς, οι αυξομειώσεις της ισχύος μπορούν να φτάσουν σε υψηλά επίπεδα. Η τυποποίηση των αυξομειώσεων στα off-shore συστήματα είναι μια πρόκληση για τις προβλέψεις αιολικής ισχύος.

## **7.1.2 Βραχυπρόθεσμες προβλέψεις χρησιμοποιώντας αριθμητικές προβλέψεις καιρού**

### **7.1.2.1 Στατιστικές και υπολογιστικής νοημοσύνης τεχνικές που εφαρμόζονται στις προβλέψεις αιολικής ισχύος**

Βιβλιογραφικά έχουν εξεταστεί πολλές τεχνικές και οι αποδόσεις τους αξιολογήθηκαν από τα συμφραζόμενα του προβλήματος πρόβλεψης της αιολικής ισχύος. Ο σκοπός δεν ήταν να φτιαχτεί ένα ολοκληρωμένο μοντέλο πρόβλεψης αλλά να αξιολογηθεί η ικανότητα πρόβλεψης αυτών των τεχνικών. Γενικά, οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιήθηκαν για να μετατρέψουν τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού σε αιολική ισχύ, το λεγόμενο «wind-to-power (W2P)» μοντέλο.

Οι Fugon et al. παρουσιάζουν μια έρευνα για την απόδοση διαφορετικών μοντέλων πρόβλεψης αιολικής ισχύος. Μελετήθηκαν δύο τύποι γραμμικής παλινδρόμησης: το ένα χρησιμοποιεί το μοντέλο απλής παλινδρόμησης ως σημείο αναφοράς και το άλλο χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό των μεταβλητών εισόδου για να δημιουργήσει επιπλέον

μεταβλητές. Τα μη γραμμικά μοντέλα που αναλύθηκαν ήταν το νευρωνικό δίκτυο, οι μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης, τα δέντρα παλινδρόμησης. Η απόδοση του κάθε μοντέλου μελετήθηκε σε τρία αιολικά πάρκα στην Γαλλία για χρονικό ορίζοντα 60 ωρών. Όλα τα μοντέλα απέδωσαν καλύτερα από την persistence και επιβεβαιώθηκε η παγκόσμια ανωτερότητα των μη γραμμικών μοντέλων στα τρία αιολικά πάρκα. Παρόλα αυτά, η απόδοση των γραμμικών μοντέλων είναι καλή συγκριτικά με το μοντέλο persistence. Το μη γραμμικό μοντέλο με τα καλύτερα αποτελέσματα ήταν το μοντέλο των τυχαίων δεσμίδων δέντρων, τα οποία είναι ένα συνδυασμός δέντρων πρόβλεψης, όπου κάθε δέντρο εξαρτάται από τις ανεξάρτητα διαλεγμένες τιμές ενός τυχαίου διανύσματος, με την ίδια κατανομή για όλα τα δέντρα στο δάσος. Η εξαιρετική απόδοση αυτού του μοντέλου δείχνει ότι η χρήση πολλαπλών μοντέλων για πρόβλεψη της αιολικής ισχύος μπορεί να μειώσει το σφάλμα πρόβλεψης, όπως βρέθηκε και σε άλλες μελέτες που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Ο Jursa συγκρίνει διαφορετικές τεχνικές για προβλέψεις αιολικής ισχύος, όπως κλασσικά πολύ-στρωματικά νευρωνικά δίκτυα εμπρόσθιας τροφοδότησης, μείγμα από ειδικούς, μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης και αναζήτηση πλησιέστερου γείτονα με χρήση του αλγορίθμου Particle Swarm optimization (PSO) για την επιλογή των χαρακτηριστικών των εισόδων διαφόρων τοποθεσιών σε μια περιοχή. Επιπλέον, συνδυάζει διαφορετικά μοντέλα υπολογίζοντας τον μέσο όρο των εξόδων των μοντέλων. Συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα για 10 αιολικά πάρκα στην Γερμανία, όπου υπήρχαν διαθέσιμες αριθμητικές προβλέψεις καιρού για κάθε αιολικό πάρκο, και το καλύτερο μοντέλο ήταν αυτό που ενσωμάτωνε τρία διαφορετικά μοντέλα (π.χ. μείγμα ειδικών, πλησιέστερου γείτονα και μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης), με 15% βελτίωση σε σχέση με το νευρωνικό δίκτυο. Από την άλλη, η χρήση όλων των μοντέλων στο σύνολο δεν είναι πάντα η καλύτερη λύση, αντίθετα, σε μερικά αιολικά πάρκα το σύνολο των 4 μοντέλων είχε μικρότερη βελτίωση από το σύνολο των 3 μοντέλων. Το καλύτερο ατομικό μοντέλο ήταν το μοντέλο «μείγμα ειδικών», το οποίο πέτυχε βελτίωση 8.8% σε σχέση με το νευρωνικό δίκτυο. Τα αποτελέσματα των μηχανών διανυσμάτων υποστήριξης είναι πάντα καλύτερα από αυτά των νευρωνικών δικτύων ενώ και το μοντέλο πλησιέστερου γείτονα ήταν καλύτερο σε μερικά αιολικά πάρκα ενώ σε άλλα ήταν καλύτερα τα νευρωνικά. Τα αποτελέσματα έδειξαν τα πλεονεκτήματα του συνδυασμού διαφόρων μοντέλων για προβλέψεις μιας μέρας μπροστά. Η πρόθεση αυτής της έρευνας ήταν να βελτιωθεί το εμπορικό μοντέλο Wind Power Management System (WPMS) που αναπτύχθηκε από το Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET).

Οι Kusiak et al. δοκίμασαν πέντε μοντέλα για την παραγωγή προβλέψεων για πολύ βραχυπρόθεσμους ορίζοντες (1 με 2 ώρες μπροστά) και βραχυ-/μακρο-πρόθεσμους ορίζοντες (3 με 84 ώρες μπροστά) χρησιμοποιώντας αριθμητικές προβλέψεις καιρού από το μοντέλο Rapid Update Cycle (RUC) και το μοντέλο North American Mesoscale (NAM), αντίστοιχα. Συγκρίθηκαν και αναλύθηκαν δύο διαφορετικές μεθοδολογίες πρόβλεψης, η άμεση μέθοδος πρόβλεψης, όπου η αιολική ισχύς προβλέπεται απευθείας από τα δεδομένα καιρικών προβλέψεων, και η ολοκληρωμένη μέθοδος, όπου προβλέπεται η ταχύτητα του ανέμου με τα δεδομένα καιρού και έπειτα προβλέπεται η ισχύς από την ήδη προβλεπόμενη ταχύτητα και χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο πλησιέστερου γείτονα. Οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν ένα αλγόριθμο δέντρου ώθησης για την επιλογή των δεδομένων των αριθμητικών προβλέψεων καιρού των πιο σχετικών σημείων που περιβάλλουν το αιολικό πάρκο.

Τα πέντε μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν: οι μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης, τα πολυστρωματικά νευρωνικά δίκτυα εμπρόσθιας τροφοδότησης, τα νευρωνικά δίκτυα συναρτήσεων ακτινωτής βάσης, τα δέντρα παλινδρόμησης και τα τυχαία forests. Το πολυστρωματικό νευρωνικό δίκτυο εμπρόσθιας τροφοδότησης αποδίδει καλύτερα από τα άλλα τέσσερα και σε βραχυπρόθεσμες και βράχυ-/μάκρυ- πρόθεσμες προβλέψεις. Η άμεση προσέγγιση απέδωσε καλύτερα από την ολοκληρωμένη μέθοδο και για τους δύο τύπους προβλέψεων. Οι συγγραφείς τόνισαν ιδιαίτερα την ισχυρή εξάρτηση μεταξύ της ακρίβειας του μοντέλου πρόβλεψης αιολικής ισχύος και της ακρίβειας του μοντέλου αριθμητικών προβλέψεων καιρού.

Οι Jursa και Rohrig παρουσίασαν μια προσέγγιση για προβλέψεις μίας ώρας μπροστά, βασιζόμενη στην εφαρμογή αλγορίθμων βελτιστοποίησης για την επιλογή χαρακτηριστικών και την βελτιστοποίηση των παραμέτρων των μοντέλων. Για να μπορέσουν να προβλέψουν για ένα μόνο αιολικό πάρκο, οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν τα μετρούμενα δεδομένα της αιολικής ισχύος διάφορων άλλων αιολικών πάρκων (30 αιολικά πάρκα), όπως επίσης και δεδομένα αριθμητικών προβλέψεων καιρού από τα αντίστοιχα σημεία πρόβλεψης που βρίσκονταν πιο κοντά στην θέση των αιολικών πάρκων. Οι πιο βασικές συνεισφορές αυτής της έρευνας ήταν η παρουσίαση μιας μεθόδου, που χρησιμοποιεί χωρικές και χρονικές πληροφορίες από μία ευρεία περιοχή ώστε να βελτιωθεί η πρόβλεψη για ένα αιολικό πάρκο, και η χρήση του PSO και της διαφορικής εξέλιξης για την αυτόματη επιλογή των μεταβλητών εισόδου και των παραμέτρων του μοντέλου. Τα δύο μοντέλα πρόβλεψης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το νευρωνικό δίκτυο και η αναζήτηση πλησιέστερου γείτονα. Το συμπέρασμα, τελικά, ήταν ότι το σφάλμα πρόβλεψης της αιολικής ισχύος μπορεί να μειωθεί με την χρήση αλγορίθμων βελτιστοποίησης για την επιλογή των χαρακτηριστικών και την ρύθμιση των παραμέτρων. Με αυτή τη μέθοδο, είναι πιθανό να μειωθεί το σφάλμα πρόβλεψης για τα περισσότερα αιολικά πάρκα, συγκριτικά με το μοντέλο του νευρωνικού δικτύου που ρυθμίζεται χειροκίνητα. Για παράδειγμα, η μέση βελτίωση του σφάλματος πρόβλεψης συγκριτικά με την persistence του καλύτερου μοντέλου ήταν 9.6% ενώ το ποσοστό ήταν 6.8% με το νευρωνικό δίκτυο που ρυθμίζεται χειροκίνητα. Συνδυάζοντας τη μέθοδο του νευρωνικού με την μέθοδο αναζήτησης πλησιέστερου γείτονα, επιτεύχθηκε βελτίωση 10.75%.

Οι Duran et al. μελέτησαν τα μοντέλα αυτοπαλινδρόμησης με εξωγενείς εισόδους (ARX) για πολύ βραχυπρόθεσμες και βραχυπρόθεσμες προβλέψεις χρησιμοποιώντας σαν είσοδο αριθμητικές προβλέψεις καιρού και δεδομένα παραγωγής εντός λειτουργίας. Παρατήρησαν ότι η βελτίωση για βραχυπρόθεσμους ορίζοντες ήταν μικρότερη ως αποτέλεσμα της αυξανόμενης σχετικότητας των παρελθοντικών τιμών εξόδου της ισχύος συγκριτικά με τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού για τον ίδιο χρονικό ορίζοντα. Από την άλλη μεριά, όταν ο ορίζοντας ήταν 24 ώρες μπροστά, η παρελθοντική τιμή εξόδου της ισχύος έχανε την σημαντικότητά του και οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού κέρδιζαν περισσότερη σχετικότητα. Όταν συγκρίνεται με την αυτοπαλινδρόμηση, η βελτίωση της αυτοπαλινδρόμησης με εξωγενείς εισόδους είναι περίπου 14% για τις 24 ώρες μπροστά και 26% συγκριτικά με την persistence.

Οι Μπαρμπούνης και Θεοχάρης επιστράτευαν τοπικώς αναδρομικά νευρωνικά δίκτυα για την πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου και της ισχύος για 72 ώρες μπροστά, βασιζόμενη



σε μετεωρολογικές πληροφορίες. Μελετήθηκαν τρία είδη τοπικών αναδρομικών δικτύων: 1. Το πολυστρωματικό νευρωνικό δίκτυο εμπρόσθιας τροφοδότησης παλμικής επιβολής (Infinite Impulse Response Multilayer Perceptron, IIR-MLP), 2. Το τοπικής ενεργοποίησης τροφοδοτούμενο πολυστρωματικό δίκτυο (Local Activation Feedback Multilayer Network, LAF-MLN) και 3. Το διαγώνια αναδρομικό νευρωνικό δίκτυο (Diagonal Recurrent Neural Network, RNN). Δύο νέοι και αποτελεσματικοί εκπαιδευτικοί αλγόριθμοι παρουσιάζονται για την εκπαίδευση εντός λειτουργίας του νευρωνικού δικτύου (π.χ. ανανεώνοντας τα βάρη και τις σταθερές κατά τη διάρκεια της λειτουργίας): ένας ολικός και ένας αναδρομικός αλγόριθμος αποσύνδεσης του σφάλματος πρόβλεψης. Στο ολικό μοντέλο αναδρομικού σφάλματος πρόβλεψης όλα τα βάρη ενημερώνονται ταυτόχρονα και, παράλληλα, για να αντιμετωπιστεί η αυξανόμενη υπολογιστική περιπλοκότητα αυτού του αλγορίθμου, αναπτύχθηκε μία τοπική εκδοχή του, που ονομάζεται αλγόριθμος αποσυνδεδεμένου αναδρομικού σφάλματος πρόβλεψης. Ο αλγόριθμος αποσυνδεδεμένου αναδρομικού σφάλματος πρόβλεψης αποτελείται από τον διαχωρισμό του ολικού προβλήματος βελτιστοποίησης σε μία ομάδα αντιμετωπίσιμων υπο-προβλημάτων στο επίπεδο του νευρώνα. Κάνοντας αυτή την ενέργεια, μπορεί να μειωθούν σημαντικά οι υπολογιστικές και αποθηκευτικές απαιτήσεις ενώ ταυτόχρονα διατηρούνται οι πολύ ακριβείς ιδιότητες του αλγορίθμου. Τα τρία αυτά αναδρομικά δίκτυα συγκρίθηκαν με δύο στατιστικά μοντέλα, ένα νευρωνικό δίκτυο πεπερασμένης αμερόληπτης απόκρισης (Finite Impulse Response NN, FIR-NN) και ένα συμβατικό στατικό πολυστρωματικό δίκτυο εμπρόσθιας τροφοδότησης. Η απόδοση των προτεινόμενων μοντέλων δοκιμάστηκε σε ένα αιολικό πάρκο στην Κρήτη και οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού δόθηκαν από την τοπική πρόβλεψη SKIRON για τέσσερα σημεία που ήταν 30 χλμ μακριά από το αιολικό πάρκο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα αναδρομικά δίκτυα απέδιδαν καλύτερα συγκριτικά με τα στατικά μοντέλα σε όλα τα χρονικά διαστήματα μπροστά. Το νευρωνικό δίκτυο πεπερασμένης αμερόληπτης απόφασης απέδωσε καλύτερα από το στατικό πολυστρωματικό δίκτυο εμπρόσθιας τροφοδότησης κατά 11.82% και 12.7% όσον αφορά το μέσο απόλυτο σφάλμα. Το αναδρομικό μοντέλο κατάφερε επίσης μια μέση βελτίωση της τάξης του 50% συγκριτικά με την persistence για χρονικά βήματα μπροστά μεγαλύτερα των 20 ωρών αλλά εξαιτίας της πλούσιας αρχιτεκτονικής του δικτύου, το IIR-MLP παρουσίασε καλύτερα αποτελέσματα και από τα δύο. Παρόμοια αποτελέσματα ισχύουν και για την πρόβλεψη της αιολικής ταχύτητας.

Αυτοί οι νέοι αλγόριθμοι εκπαίδευσης δίνουν την δυνατότητα να αντιμετωπιστούν οι αλλαγές στην συμπεριφορά και την λειτουργία των αιολικών πάρκων, όπως επίσης και σε χαμηλή υπολογιστική ικανότητα. Οι Bessa et al. ανέδειξαν την χρήση του αλγορίθμου ανάστροφης μετάδοσης για την απευθείας εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου εντός λειτουργίας. Η μεθοδολογία είναι ως εξής: 1. Εκπαίδευση ενός νευρωνικού χρησιμοποιώντας την μέθοδο της ανάστροφης μετάδοσης χρησιμοποιώντας τα διαθέσιμα ιστορικά δεδομένα, 2. Σε κατάσταση λειτουργίας, το νευρωνικό δίκτυο παράγει προβλέψεις για το χρονικό δείγμα  $t+k$ , την χρονική στιγμή  $t$  και 3. Όταν γίνει γνωστή η μετρούμενη τιμή, ο παρελθοντικός χρόνος  $k$  κρατάει τις προβλέψεις του νευρωνικού δικτύου ξανά για την χρονική στιγμή  $t$  και το σφάλμα πρόβλεψης για την στιγμή  $t$  (στην καινούρια μετρούμενη τιμή) υπολογίζεται και μεταδίδεται ανάστροφα μέσω του δικτύου (τα βάρη και οι σταθερές ενημερώνονται) μόνο μία φορά. Αυτή η μεθοδολογία κάνει δυνατή την επαρκή διαχείριση των συνεχώς λαμβανόμενων δεδομένων υπό την παρουσία αλλαγών και μετακινήσεων που χαρακτηρίζουν



τον άνεμο. Αυτές οι αλλαγές είναι αποτέλεσμα της πρακτικής λειτουργίας των αιολικών πάρκων, δηλαδή προκαλούνται από μεταβολές στην ικανότητα παραγωγής ή εξαιτίας συντήρησης ή βλάβης ή απλά από προσθήκες στην ικανότητα παραγωγής. Τα αποτελέσματα από δύο αιολικά πάρκα στην Πορτογαλία έδειξαν ότι υπήρξε μια βελτίωση με την χρήση της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου σε κατάσταση λειτουργίας, όχι μόνο σε κανονική λειτουργία αλλά και σε περιπτώσεις μεταβολών.

Είναι γνωστό ότι η ταχύτητα του ανέμου έχει μια μη γραμμική σχέση με την καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας και έτσι η μεταβολή της αιολικής ταχύτητας σε αιολική ισχύ μεταβάλλει τις στατιστικές ιδιότητες των σφαλμάτων. Αυτό φάνηκε και από μια έρευνα που έγινε σε έξι τοποθεσίες στην Γερμανία, όπου οι κατανομές των σφαλμάτων από τα μοντέλα πρόβλεψης της αιολικής ισχύος ήταν ασύμμετρες. Παρουσίαζαν μεγαλύτερη συχνότητα σφαλμάτων στα αριστερά του μέσου και ήταν πιο επίπεδες από την Γκαουσιανή κατανομή.

Παρατηρώντας την βιβλιογραφία, μπορεί κανείς να καταλάβει ότι με τον έναν ή τον άλλο τρόπο, τα μοντέλα εξαρτώνται από μια διαδικασία εκπαίδευσης και συνήθως χρησιμοποιούν το ελάχιστο τετραγωνικό σφάλμα σαν κριτήριο. Η εφαρμοστικότητα του ελάχιστου τετραγωνικού σφάλματος για την εκπαίδευση ενός καταγραφέα (οποιοδήποτε μοντέλο που καταγράφει την σχέση εισόδου-εξόδου, όπως τα νευρωνικά δίκτυα, τα συστήματα ασαφούς λογικής, οι χρονοσειρές και άλλα, με μη γνωστές παραμέτρους) είναι βέλτιστη αν η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας των σφαλμάτων πρόβλεψης είναι Γκαουσιανή. Η ελαχιστοποίηση του τετραγωνικού σφάλματος είναι ισοδύναμη με την ελαχιστοποίηση της διακύμανσης της κατανομής του σφάλματος. Χρησιμοποιώντας αυτό το κριτήριο, οι υψηλότερες ροπές (π.χ. κλίση, κύρτωση) δεν καταγράφονται. Παρόλα αυτά, περιέχουν πληροφορίες που μπορούν να περαστούν στις παραμέτρους (βάρη) του νευρωνικού δικτύου αντί να παραμείνουν στην κατανομή του σφάλματος. Η παρουσία μη-Γκαουσιανών κατανομών έχει δώσει βάση για περαιτέρω έρευνες για νέες τεχνικές εκπαίδευσης των καταγραφέων. Στις προβλέψεις της αιολικής ισχύος, η παρουσία ενός καλού καταγραφέα, σημαίνει ότι είναι πιθανό να παραχθούν καλύτερες εκτιμήσεις ενός «wind-2-power» μοντέλου. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, αναπτύχθηκαν εναλλακτικές συναρτήσεις κόστους.

Οι Miranda et al. και Bessa et al. στην πρώτη εφαρμογή που αφορούσε της πρόβλεψη της αιολικής ισχύος, χρησιμοποίησαν έναν αλγόριθμο EPSO (Evolutionary Particle Swarm Optimization) για να την εκτός λειτουργίας βελτιστοποίηση των βαρών ενός συστήματος ασαφούς λογικής Tagaki-Sugeno, το οποίο λειτουργούσε ως μοντέλο «wind-2- power», και συγκεκριμένα συγκρίθηκε ένα σύστημα ασαφούς λογικής Takagi-Sugeno εκπαιδευμένο με το μέσο τετραγωνικό σφάλμα και ένα εκπαιδευμένο με την ελαχιστοποίηση της δευτεροβάθμιας Renyi εντροπίας της κατανομής του σφάλματος. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στο μοντέλο βασισμένο στην εντροπία, η συχνότητα των λαθών κοντά στο μηδέν είναι μεγαλύτερη.

Σε μια άλλη μελέτη, οι Bessa et al. αξιολόγησαν την απόδοση των νευρωνικών δικτύων, που εκπαιδεύτηκαν σε κατάσταση εκτός λειτουργίας, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του κριτηρίου του μέσου τετραγωνικού σφάλματος με τρία άλλα κριτήρια εμπνευσμένα από το Information Theoretical Learning, ITL. Το συμπέρασμα από την ανάλυση δύο πραγματικών

περιπτώσεων σε αιολικά πάρκα στην Πορτογαλία, ένα πάρκο 21.6 MW (12 μονάδες 1.8 MW η καθεμία) και ένα πάρκο 16.2 MW (17 μονάδες των 0.6 MW και 3 των 2 MW), ήταν ότι στην εκπαίδευση σε κατάσταση εκτός λειτουργίας, η εντροπία, σαν κριτήριο απόδοσης, οδηγεί σε καλύτερες προβλέψεις (όσον αφορά στη συχνότητα των σφαλμάτων κοντά στο μηδέν και σε μη-ευαισθησία σε έκτοπα), σε αντίθεση με την υιοθέτηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος σαν κριτήριο εκπαίδευσης. Στα δύο αιολικά πάρκα στην Πορτογαλία, δοκιμάστηκε η κατανομή σφαλμάτων του μέσου τετραγωνικού σφάλματος και δύο κριτήρια εμπνευσμένα από το ITL, η ελάχιστη εντροπία σφάλματος (Minimum Error Entropy, MEE) και το κριτήριο μέγιστης correntropy (Maximum Correntropy Criteria, MCC).

Σαν αποτέλεσμα, ήταν δυνατό να ανακτηθεί μία πιο στενή(narrow) συνάρτηση κατανομής πιθανότητας με τα κριτήρια MEE και MCC από ότι με το μέσο τετραγωνικό σφάλμα. Στην πραγματικότητα, αν οι συναρτήσεις κατανομής πιθανότητας των σφαλμάτων ήταν Γκαουσιανές, το κριτήριο του μέσου τετραγωνικού σφάλματος θα απέδιδε όπως και ένα κριτήριο βασιζόμενο στην εντροπία, αλλά η περίπτωση δεν ήταν τέτοια.

Έτσι, σύμφωνα με την θεωρία, είναι δυνατό να σχεδιαστεί ένας καταγραφέας που θα παρήγαγε μία πρόβλεψη με υψηλότερη συχνότητα σφαλμάτων γύρω από το μηδέν, ένα χαρακτηριστικό που σχετίζεται με την χαμηλή εντροπία των συναρτήσεων κατανομής πιθανότητας. Γενικά, αυτό είναι το επιθυμητό.

Οι Bessa et al. παρουσίασαν πρακτικά αποτελέσματα που ουσιαστικά υποστήριζαν δύο ιδέες:

1. Ότι τα κριτήρια που βασίζονται στην εντροπία της κατανομής των σφαλμάτων πρόβλεψης είναι καταλληλότερα για την εκπαίδευση μοντέλων ακριβών προβλέψεων αιολικής ισχύος σε σχέση με το παραδοσιακό κριτήριο μέσου τετραγωνικού σφάλματος, και
2. Τα κριτήρια που βασίζονται στην εντροπία μπορούν να μεταλλαχθούν σε προσαρμοζόμενα μοντέλα εντός λειτουργίας που αποδίδουν καλύτερα από τα μοντέλα που εκπαιδεύονται σε κατάσταση εκτός λειτουργίας, όταν χρησιμοποιούνται νευρωνικά δίκτυα εμπρόσθιας τροφοδότησης. Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε για δύο αιολικά πάρκα στην Πορτογαλία και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το κανονικοποιημένο μέσο απόλυτο σφάλμα του κριτηρίου ITL είναι πιο μικρό από το σφάλμα του κριτηρίου μέσου τετραγωνικού σφάλματος και τα πλεονεκτήματα της χρήσης της εκπαίδευσης εντός λειτουργίας είναι περισσότερα.

Οι Salcedo-Sanz et al. παρουσίασαν μια υβριδοποίηση του μοντέλου MM5 με ένα νευρωνικό δίκτυο, που διαχειρίζεται αποτελεσματικά την τελική διαδικασία στατιστικής διαβάθμισης προς τα κάτω (downscaling) για την εξαγωγή προβλέψεων της αιολικής ταχύτητας για κάθε ανεμογεννήτρια ενός αιολικού πάρκου. Το μοντέλο MM5 εκτελεί έναν φυσικό υποσκελισμό των δεδομένων από το παγκόσμιο μοντέλο ώστε να εξάγει μια πρόβλεψη της αιολικής ταχύτητας για ένα πλέγμα μικρής περιοχής. Στην δεύτερη διαδικασία διαβάθμισης προς τα κάτω (στατιστική), ένα νευρωνικό δίκτυο λαμβάνει ως εισόδους τις παρακάτω μεταβλητές: την αιολική ταχύτητα που προβλέφθηκε σε δύο πλεγματικά σημεία που περιβάλλουν το αιολικό πάρκο, τη διεύθυνση του ανέμου σε ένα από τα σημεία, τη θερμοκρασία σε ένα από τα σημεία και δύο εξισώσεις ηλιακού κύκλου. Η έξοδος του νευρωνικού δικτύου είναι η προβλεπόμενη αιολική ταχύτητα για κάθε ανεμογεννήτρια.

#### 7.1.2.2 Μοντέλο συστημάτων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος

Στην βιβλιογραφία, είναι πιθανό να βρει κανείς διάφορες περιγραφές προτύπων συστημάτων πρόβλεψης. Μερικά από αυτά έχουν τεθεί ήδη στις μέρες μας σε λειτουργία ενώ άλλα είναι αποτέλεσμα μόνο ερευνητικών μελετών και αναμένεται να εμπορευματοποιηθούν στο κοντινό μέλλον. Αντίθετα με τις τεχνικές που περιγράφηκαν παραπάνω, η δομή αυτών των συστημάτων πρόβλεψης αιολικής ισχύος περιλαμβάνει διάφορες μεθόδους φυσικές και στατιστικές με διαφορετικά αντικείμενα.

Οι Jørgensen et al. περιέγραψαν μια μέθοδο, που ονομάζεται HIRPOM (HIRlam Power prediction Model), όπου το κομμάτι της πρόβλεψης της ισχύος ήταν ενσωματωμένο μέσα στις αριθμητικές προβλέψεις καιρού. Τα κύρια συμπεράσματα παρουσιάζονται στο Giebel et al.'s State of the Art:

«Η Moehrle ερεύνησε την αναγκαία ανάλυση για την επιτυχημένη εφαρμογή των αριθμητικών προβλέψεων καιρού. Στην μελέτη, με το Δανικό μοντέλο HIRLAM (High-resolution Limited Area Model) σε μία τοποθεσία στην Ιρλανδία, αναδεικνύει τους λόγους που ένα μοντέλο αριθμητικών προβλέψεων καιρού δίνει ανεπαρκώς ακριβείς ταχύτητες του επιφανειακού ανέμου. Μεταξύ άλλων, οι λόγοι είναι: μέχρι στιγμής, κανένας πελάτης δεν ζήτησε να αυξηθεί η ακρίβεια στην πρόβλεψη των επιφανειακών ανέμων αφού η ακρίβεια αυτών που ήδη υπάρχουν είναι αρκετά καλή. Η τοπογραφική ανάλυση δεν είναι αρκετά καλή ώστε να ληφθεί υπ' όψιν, για παράδειγμα, σε φαινόμενα γέφυρας κοιλάδας. Οι ακριβείς προβλέψεις χρειάζονται πιο υψηλή ανάλυση και μεγαλύτερη περιοχή κάλυψης. Παρόλα αυτά, το να επιτευχθούν και τα δύο είναι πολύ ακριβό και μόνο μερικά μοντέλα αριθμητικών προβλέψεων καιρού μπορούν να διαχωρίσουν την στεριά από τη θάλασσα και να ρυθμίσουν την ανάλυση αντίστοιχα. Με σκοπό να βελτιώσει την ήδη υπάρχουσα κατάσταση, η Moehrle υπολόγισε την ισχύ απευθείας από το μοντέλο αριθμητικών προβλέψεων καιρού. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι 'οι μεγάλες φυσικές ιδιότητες, όπως η τραχύτητα που εξαρτάται από την διεύθυνση, η πραγματική πυκνότητα και η διαστρωμάτωση των ατμοσφαιρικών οριακών στρωμάτων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στους υπολογισμούς'. Σε διαφορετικές εκτελέσεις με οριζόντιες αναλύσεις 30 χλμ, 15 χλμ, 5 χλμ και 1.4 χλμ για δύο μήνες τον Ιανουάριο του 2001, τα πιο κοινά στατιστικά μέτρα ακρίβειας (MAE, RMSE, συσχέτιση, κλπ) βελτιώθηκαν μόνο λίγο με τις υψηλότερες αναλύσεις. Παρόλα αυτά, οι κορυφαίες τιμές της ταχύτητας του ανέμου ήταν πιο κοντά στις μετρούμενες τιμές για τις προβλέψεις υψηλότερης ανάλυσης. Για αυτές τις προβλέψεις, τα καλύτερα επίπεδα των μοντέλων ήταν αυτά που είναι πιο κοντά στο έδαφος, σε αντίθεση με τα κοινά μοντέλα. Όσον αφορά τα σφάλματα, τονίζει ότι τα σφάλματα φάσης έχουν μεγαλύτερη επιρροή στα κριτήρια αξιολόγησης από ότι τα χωρικά σφάλματα. Σαν μια πιθανή λύση, προτείνει την χρήση ανεξάρτητων δεδομένων των ανεμογεννητριών σαν εισόδους για τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού, αυξάνοντας το παρατηρούμενο μετεωρολογικό δίκτυο.»

Η ανάπτυξη ενός συστήματος πρόβλεψης της αιολικής ισχύος για την ισπανική IBERDROLA καταγράφεται στο και παρουσιάζονται τα προκαταρκτικά αποτελέσματα ενός συστήματος πρόβλεψης μέχρι και 48 ώρες μπροστά χρησιμοποιώντας τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού από το RAMS. Όταν είναι διαθέσιμες οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού,

η αιολική ταχύτητα μετατρέπεται σε αιολική ισχύ. Μερικές μέθοδοι μελετήθηκαν για τον υπολογισμό της καμπύλης ισχύος του αιολικού πάρκου χρησιμοποιώντας την ταχύτητα ή την κατεύθυνση του ανέμου:

1. Χρησιμοποιώντας τμήματα όμοια με την κανονική διαδικασία για τον έλεγχο της απόδοσης της ανεμογεννήτριας (International Standard IEC 61400-12),
2. Χρησιμοποιώντας μια γραμμή τάσης που συσχετίζει την ισχύ με την αιολική ταχύτητα,
3. Συσχετίζοντας την ροή του ανέμου και την αιολική ταχύτητα που μετράται από το ανεμόμετρο και έπειτα χρησιμοποιώντας την συσχέτιση μεταξύ αιολική ταχύτητας και παραγωγής και
4. Υπολογίζοντας την παραγόμενη ισχύ από κάθε ανεμογεννήτρια χρησιμοποιώντας την ταχύτητα του ανέμου και την κατεύθυνση που μετράται από τον μετεωρολογικό πύργο.

Οι Ramírez-Rosado et al. περιέγραψαν ένα μοντέλο που περιλαμβάνει μια ομάδα μοντέλων πρόβλεψης, καλύπτοντας όλη την κλίμακα των οριζόντων πρόβλεψης. Υπάρχουν συγκεκριμένα μοντέλα για πολύ βραχυπρόθεσμες προβλέψεις και ειδικευμένα μοντέλα πρόβλεψης για την επόμενη μέρα. Η ομάδα των καλύτερων μοντέλων επιλέχθηκε σύμφωνα με τον ορίζοντα και την στιγμή που γίνονται οι προβλέψεις. Επιλέχθηκαν τρία μοντέλα για κάθε ορίζοντα πρόβλεψης έτσι ώστε οι έξοδοί τους να ήταν οι είσοδοι ενός συστήματος ασαφούς λογικής που παρείχε την προβλεπόμενη τιμή σαν ένα μη γραμμικό συνδυασμό των εξόδων των τριών επιλεγμένων μοντέλων. Υπήρχαν εννιά συστήματα ασαφούς λογικής, ένα για κάθε ορίζοντα πρόβλεψης. Για την βελτίωση της απόδοσης του συστήματος παγκοσμίως προβλέψεων στις πολύ βραχυπρόθεσμες προβλέψεις, χρησιμοποιήθηκε ένα φίλτρο Kalman και ο σκοπός ήταν η μείωση της σταθεράς στην προβλεπόμενη τιμή για την μέση αιολική ταχύτητα που δίνεται από ένα μοντέλο αριθμητικών προβλέψεων καιρού. Το μοντέλο δοκιμάστηκε σε ένα αιολικό πάρκο στα βόρεια της Πορτογαλίας, σε μια περίπλοκη περιοχή με βουνά και χρησιμοποιώντας αρκετά χρονικά διαστήματα στις εφαρμογές της παραγόμενης ισχύς του αιολικού πάρκου (ημερήσια και ενδοημερήσια αγορά). Το μέγεθος των σφαλμάτων πρόβλεψης που αποκτήθηκαν είναι πολύ ικανοποιητικό συγκριτικά με την τεχνολογία αιχμής («state-of-the-art»). Όπως αναμενόταν, στην εφαρμογή της ενδοημερήσιας αγοράς, το σφάλμα ήταν μικρότερο από το σφάλμα της ημερήσιας και η βελτίωση της RMSE συγκριτικά με την Persistence κυμαινόταν από ένα ελάχιστο 7% για την πρώτη ώρα μέχρι ένα μέγιστο 65%, με μέση τιμή 48%.

Οι Pinson και Καρινιωτάκης παρουσίασαν ένα μοντέλο αιολικών προβλέψεων που χρησιμοποιεί μετρήσεις SCADA σε κατάσταση λειτουργίας και αριθμητικές προβλέψεις καιρού. Το σύστημα πρόβλεψης χρησιμοποιεί ασαφή νευρωνικά δίκτυα για πολύ βραχυπρόθεσμους (1-10 ώρες) και βραχυπρόθεσμους (1-48 ώρες) χρονικούς ορίζοντες. Ένας αλγόριθμος προσομοίωσης ενίσχυσης ελέγχει την διαδικασία εκπαίδευσης και για τον τερματισμό της εφαρμόζεται διασταυρωμένη τεκμηρίωση. Αυτό το είδος μοντέλου χρησιμοποιείται στο ARMINES (Association pour la Recherche et le Développement des Méthodes et Processus Industriels) σύστημα προβλέψεων αιολικής ισχύος (AWPPS). Η κύρια συνεισφορά της μελέτης αυτής, εκτός από την μέθοδο εκτίμησης διαστημάτων πρόβλεψης και κινδύνων, είναι το γεγονός ότι αντικαθιστά την κλασσική μέθοδο δοκιμή-και-σφάλμα

όπου πολλές ρυθμίσεις δοκιμάζονται από έναν δεσμευτικό, μη γραμμικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Ο μονοδρομικός αλγόριθμος επιλέγει τις σχετικές πληροφορίες (ταχύτητα του ανέμου, κατεύθυνση, κλπ) για το μοντέλο, όπου οι μεταβλητές απόφασης αναπαριστούν τον αριθμό των ασαφών ομάδων για τον συγκεκριμένο τύπο δεδομένων εισόδου.

Οι Yamaguchi et al. περιέγραψαν ένα μοντέλο που λαμβάνει σαν εισόδους δεδομένα αριθμητικών προβλέψεων καιρού από το Ιαπωνικό Μετεωρολογικό Κέντρο (JMA) και δεδομένα SCADA από τα αιολικά πάρκα. Οι προβλέψεις που γίνονται από το JMA διαβαθμίζονται (downscale) στην οριζόντια ανάλυση του 1 χλμ από το μοντέλο μεσαίας κλίμακας, RAMS. Έπειτα, η προβλεπόμενη αιολική ταχύτητα μετατρέπεται σε αιολική ισχύ, βασιζόμενη στην καμπύλη ισχύος του αιολικού πάρκου που υπολογίστηκε από τις ιστορικές τιμές της προβλεπόμενης αιολικής ταχύτητας και της μετρούμενης τιμής. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των προβλέψεων της αιολικής ισχύς βασίστηκε στην μέθοδο της αυτοπαλινδρόμησης με εξωγενείς εισόδους, όπου η τελικώς προβλεπόμενη ισχύς είναι ένας συνδυασμός της υπολογισμένης καμπύλης ισχύος και της μετρούμενης ισχύος των αιολικών πάρκων. Η κύρια συνεισφορά αυτής της μελέτης είναι η βελτίωση της μεθόδου αυτοπαλινδρόμησης με εξωγενείς εισόδους. Το νέο μοντέλο χρησιμοποιεί μια νέα παράμετρο στην τυποποίηση των λειτουργικών απροόπτων των αιολικών πάρκων. Το νέο στατιστικό μοντέλο ονομάζεται ARXM, αυτο-παλινδρομικό με εξωγενείς μεταβλητές εισόδου και παράμετρο με την χρονική κλίμακα. Η άλλη κύρια συνεισφορά του μοντέλου είναι η μέθοδος των συντελεστών μεταφοράς. Αυτή η συνάρτηση μεταφοράς είναι μια αναλογία μεταξύ της ταχύτητας του ανέμου από το μοντέλο μεσαίας κλίμακας και την ταχύτητας του ανέμου από το μοντέλο JMA. Ενώ η προσομοίωση μεσαίας κλίμακας απαιτεί 3-4 ώρες με τον παράλληλο υπολογιστή (που απαιτεί οχτώ επεξεργαστές), η προτεινόμενη μέθοδος συντελεστών μεταφοράς παίρνει μόνο λίγα λεπτά με έναν υπολογιστή. Η ακρίβεια της πρόβλεψης είναι σχεδόν η ίδια αλλά το αποτέλεσμα αυτό πρέπει να επιβεβαιωθεί και σε διαφορετικούς τύπους εδαφών και καιρικές συνθήκες.

Οι Σιδεράτος και Χατζηαργυρίου περιέγραψαν ένα σύστημα πρόβλεψης της αιολικής ισχύος που χρησιμοποιεί τεχνητή νοημοσύνη και τεχνικές σαφούς λογικής. Η κύρια συνεισφορά αυτής της μελέτης είναι ο συνδυασμός των νευρωνικών δικτύων συναρτήσεων ακτινωτής βάσης με το μοντέλο ασαφούς λογικής, για την βελτίωση της χρήσης των αριθμητικών προβλέψεων καιρού. Η συνολική μεθοδολογία πρόβλεψης μπορεί να διαιρεθεί σε τρία κύρια σημεία:

1. Την προκαταρτική πρόβλεψη της αιολικής ισχύος,
2. Ένα μοντέλο που παρέχει ένα ποιοτικό δείκτη των αριθμητικών προβλέψεων καιρού και
3. Ένα τελικό μοντέλο αιολικών προβλέψεων.

Το πρώτο μοντέλο παρέχει της αρχικές προβλέψεις της ισχύος και εμπεριέχει έναν αυτό-οργανωνόμενο χάρτη, που διαχωρίζει την πρόβλεψη της αιολικής ταχύτητας σε τρεις τάξεις σύμφωνα με το μέγεθος (μικρό, μεσαίο, μεγάλο), και τρία νευρωνικά δίκτυα συναρτήσεων ακτινωτής βάσης που προβλέπουν την αιολική παραγωγή. Το δεύτερο μοντέλο αποτελείται από ένα μοντέλο ασαφούς λογικής και δύο νευρωνικά δίκτυα συναρτήσεων ακτινωτής βάσης. Το ένα RBF νευρωνικό δίκτυο παίρνει τις τιμές της προβλεπόμενης αιολικής ταχύτητας σαν



εισόδους, ενώ το άλλο παίρνει σαν εισόδους την προβλεπόμενη κατεύθυνση και την ώρα πρόβλεψης. Η διαφορά μεταξύ των εξόδων αυτών των δύο RBF νευρωνικών δικτύων και του προηγούμενου μοντέλου είναι ότι αυτά παρέχουν πληροφορίες για τις «φτωχές» αριθμητικές προβλέψεις καιρού. Το μοντέλο ασαφούς λογικής αναγνωρίζει τις «φτωχές» αριθμητικές προβλέψεις καιρού και το μοντέλο υπολογίζει την ποιότητα των αριθμητικών προβλέψεων καιρού όταν οι διαφορές παίρνουν μεγάλες τιμές και η κατεύθυνση του ανέμου είναι εκτός των αναμενόμενων ορίων. Το τρίτο μοντέλο περιέχει τρία νευρωνικά δίκτυα συναρτήσεων ακτινωτής βάσης, το οποίο παρέχει την τελική πρόβλεψη για κάθε μία από τις τρεις τάξεις ανέμου. Η απόδοση της μεθοδολογίας συγκριτικά με τα πρόσφατα μοντέλα state-of-art είναι κοντά με τα καλύτερα μοντέλα και μερικές φορές είναι και καλύτερη από την απόδοσή τους για ορίζοντες 48 ωρών μπροστά. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται σε αυτή τη μελέτη διεξήχθησαν σε ένα αιολικό πάρκο εντός πελάγους (offshore), το οποίο κάνει την διεξαγωγή προβλέψεων πιο δύσκολη.

Οι Costa et al. παρουσίασαν αποτελέσματα από μία υβριδική στατιστική/φυσική μέθοδο. Ο σκοπός ήταν ο συνδυασμός μοντέλων που βασίζονται μόνο σε χρονοσειρές, για πολύ βραχυπρόθεσμες προβλέψεις, με ένα φυσικό μοντέλο με καλή απόδοση μεταξύ 9 και 72 ωρών και για να γίνει αυτό, βρήκαν το κομβικό σημείο μεταξύ και των δύο καμπύλων σφάλματος. Τα τρία στατιστικά μοντέλα που μελετήθηκαν για την παραγωγή προβλέψεων μέχρι και 10 ώρες μπροστά είναι τα αυτοπαλινδρομικά μοντέλα, τα μοντέλα ασαφούς λογικής και τα νευρωνικά δίκτυα. Το μοντέλο που απέδωσε καλύτερα ήταν το ασαφές μοντέλο. Επίσης, μελετήθηκαν και τρεις διαφορετικές δομές των φυσικών μοντέλων, χρησιμοποιώντας αριθμητικές προβλέψεις καιρού για όλα, όπου οι κύριες διαφορές μεταξύ τους ήταν η ευστάθεια και οι εισοδοί του μοντέλου της καμπύλης ισχύος. Τα δύο μοντέλα βασίζονταν σε μη-ουδέτερη ευστάθεια και το άλλο σε ουδέτερη ευστάθεια. Επίσης, δύο από τα μοντέλα βασίζονταν στην μετατροπή της αιολικής ταχύτητας σε ισχύ στην θέση του ιστίου του ανεμόμετρου αναφοράς (πρόβλεψη της ισχύος εξόδου του αιολικού πάρκου), ενώ το άλλο βασιζόταν στην ατομική μετατροπή στην θέση της ανεμογεννήτριας (πρόβλεψη για κάθε ανεμογεννήτρια). Το φυσικό μοντέλο με την καλύτερη απόδοση ήταν αυτό που χρησιμοποιούσε την ουδέτερη ευστάθεια και την μετατροπή της αιολικής ταχύτητας σε ισχύ στην θέση του ανεμομέτρου αναφοράς.

Οι συγγραφείς ανακάλυψαν ότι ο συνδυασμός βελτιώνει την πρόβλεψη σε μεσαίος ορίζοντες (3-9 ώρες). Τα στατιστικά μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν για πολύ βραχυπρόθεσμους (1-3 ώρες) και τα φυσικά μοντέλα για μακροπρόθεσμους ορίζοντες (9-36 ώρες).

Σύμφωνα με τη μελέτη από τη Δανική PSO με τίτλο «Έξυπνα συστήματα πρόβλεψης της αιολικής ισχύος». Κατά τη διάρκεια της μελέτης, εξετάστηκαν και περαιτέρω βελτιώσεις και αυτοματοποιημένα εργαλεία για βραχυπρόθεσμες προβλέψεις της αιολικής ισχύος. Αυτά τα εργαλεία απέδειξαν ότι είναι μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική των εργαλείων των λειτουργικών προβλέψεων που χρησιμοποιούνται στις μέρες μας. Τα συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν για την έρευνα ήταν το WPPT (Wind Power Prediction Tool, εργαλείο πρόβλεψης αιολικής ισχύος) και το Prediktor. Τα κύρια πλεονεκτήματα που αναφέρονται σε αυτή τη μελέτη έχουν να κάνουν με την απόδοση, την στιβαρότητα (robustness) στις εξωτερικές αναταράξεις και τις απλοποιήσεις στην ρύθμιση αυτών των συστημάτων.



Παράλληλα, αναπτύχθηκαν μέθοδοι για την αυτόματη επιλογή των παραμέτρων ρύθμισης, με τις οποίες το σύστημα είναι ικανό να αυτό-βαθμονομείται και να αυτό- ρυθμίζεται.

Κανονικά, οι στατιστικές μέθοδοι χρειάζεται να εκπαιδεύονται με ιστορικά δεδομένα που αφορούν αριθμητικές προβλέψεις καιρού και την αιολική παραγωγή αλλά, στα νέα αιολικά πάρκα, τα ιστορικά δεδομένα μερικές φορές μπορεί να μην είναι διαθέσιμα ή να είναι λίγα, ποσοτικά. Αυτό το γεγονός επηρεάζει το σφάλμα πρόβλεψης των αρχικών εκτιμήσεων μέχρι η επίδραση των αρχικών εκτιμήσεων να εξαφανιστεί. Έτσι, οι συγγραφείς μελέτησαν την βελτίωση της αρχικής απόδοσης με την πρόσθεση μιας «θεωρητικής» καμπύλης ισχύος του αιολικού πάρκου υπολογισμένη με WASP (Wind Atlas Analysis and Application Program).

Μια άλλη μέθοδος που μελετήθηκε για την βελτίωση της απόδοσης, ενέπλεκε τον συνδυασμό κάμπωπων μετεωρολογικών προβλέψεων και έδειξε ότι μια απλή βέλτιστη και αυτό-βαθμονομούμενη διαδικασία για τον συνδυασμό μερικών προβλέψεων μπορεί εύκολα να βελτιώσει το σφάλμα πρόβλεψης. Τα αποτελέσματα του αιολικού πάρκου Klim στην Δανία έδειξαν μια βελτίωση 15% με συνολικό επίπεδο 9% στο NRMSE, συγκριτικά με τον συνδυασμό DMI(Danish Meteorological Institute)-DWD(Deutscher Wetterdienst)-NCEP με μια καλή DMI-HIRLAM πρόβλεψη.

### 7.1.3 Τοπική πρόβλεψη

Σε αυτό το κομμάτι, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της έρευνας που αφορούν την επίδραση της ομαδοποίησης των αιολικών πάρκων, όπως επίσης, και η επιλογή των αιολικών πάρκων αναφοράς και η επίδρασή της στο σφάλμα πρόβλεψης των τοπικών προβλέψεων αιολικής ισχύος.

Όσον αφορά τις τοπικές προβλέψεις (ή την αναβάθμιση), πολλές μελέτες έχουν εκδοθεί που ασχολούνται με τα σφάλματα και τις επιδράσεις που έχουν στην αναμενόμενη αιολική παραγωγή όλης της περιοχής, ο αριθμός και η τοποθεσία των αιολικών πάρκων αναφοράς. Στην βιβλιογραφία, αναφέρεται σαφώς ότι με την ομαδοποίηση πολλών αιολικών πάρκων μιας ευρείας περιοχής, τα σφάλματα πρόβλεψης με ασθενή συσχέτιση εξαλείφονται εξαιτίας των στατιστικών επιπτώσεων. Συνεπώς, αυτές οι στατιστικές επιδράσεις εξομάλυνσης μειώνουν τα σφάλματα πρόβλεψης μιας περιοχής, συγκριτικά με ένα μόνο αιολικό πάρκο.

Οι Focken et al. μελέτησαν την επίδραση που έχουν δύο παράμετροι στο μέγεθος του σφάλματος τοπικής πρόβλεψης, στην χωρική επέκταση της περιοχής και στον αριθμό των αιολικών πάρκων που περιέχει, μαζί με την κατανομή τους. Τα αποτελέσματα που παρουσίασαν ήταν ότι η αναλογία μεταξύ της απόκλισης του συνόλου και της απόκλισης του ενός αιολικού πάρκου μειώνεται όταν αυξάνεται το μέγεθος της περιοχής για διαφορετικούς χρονικούς ορίζοντες. Αυτή η μείωση δεν είναι τόσο αξιοσημείωτη όσο η μείωση στους μεγάλους χρονικούς ορίζοντες. Η αναλογία μειώνεται, όπως και η συνάρτηση του αριθμού των θέσεων στην περιοχή. Παρόλα αυτά, φτάνει σε ένα επίπεδο κορεσμού στο οποίο η μείωση του σφάλματος δε εξαρτάται πλέον από τον αριθμό των θέσεων. Το κύριο συμπέρασμα είναι ότι το μέγεθος του σφάλματος πρόβλεψης εξαρτάται αναλογικά από το μέγεθος της περιοχής: όσο μεγαλύτερη είναι η περιοχή.

Επιπλέον, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για περιοχές με επαρκή αριθμό από αιολικά πάρκα εξαπλωμένα το ίδιο, είναι δυνατό να εκτιμηθεί η επίδραση της τοπικής ομαλοποίησης του σφάλματος πρόβλεψης της αιολικής ισχύος λαμβάνοντας υπ' όψιν το μέγεθος της αναλύομενης περιοχής. Οι συγγραφείς τόνισαν, επίσης, ότι η ομαδοποίηση των αιολικών πάρκων δεν μπορεί να απαλείψει μεμονωμένα γεγονότα, όπως το μέτωπο των καταιγίδων ή τα σφάλματα φάσης, διότι οι διαμορφώσεις του καιρού έχουν μια συνεκτική δομή, που κανονικά εκτείνεται σε μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα. Συνεπώς, η συσχέτιση μεταξύ των σφαλμάτων πρόβλεψης είναι ψηλότερη σε αυτή την περίπτωση.

Οι Lang et al. έδειξαν ότι με έναν συνδυασμό αυξανόμενης διασποράς των αιολικών πάρκων και αυξανόμενου αριθμού αιολικών πάρκων, το σφάλμα πρόβλεψης της αιολικής ισχύος μειώνεται, όπως επίσης και ο συντελεστής μέσου φορτίου για το αιολικό πάρκο. Τα σφάλματα πρόβλεψης αυξάνονται με την αύξηση του συντελεστή φορτίου ως αποτέλεσμα των αυξανόμενων ανώμαλων καιρικών φαινομένων και των υψηλότερων μέσων αιολικών ταχυτήτων.

Οι Gastón et al. αξιολόγησαν την επίδραση των ομαδοποιήσεων των αιολικών πάρκων στα σφάλματα πρόβλεψης. Το σφάλμα από μια ομαδοποίηση είναι χαμηλότερο συγκριτικά με το σφάλμα από μία μόνο πρόβλεψη. Οι συγγραφείς συνειδητοποίησαν ότι υπάρχει ένα όριο στην μείωση του σφάλματος με την ομαδοποίηση. Στην πραγματικότητα, ομάδες των περισσότερων από τρία αιολικά πάρκα οδηγούν σε σημαντική μείωση των σφαλμάτων. Η καλύτερη μείωση του σφάλματος έγινε για τρία αιολικά πάρκα που βρίσκονταν σε διαφορετικές περιοχές.

Οι Pinson et al. πέτυχαν μείωση μεταξύ 25-30% του επιπέδου του σφάλματος πρόβλεψης, συγκριτικά με το σφάλμα ενός μόνο αιολικού πάρκου. Κατέληξαν, επίσης, ότι τα προχωρημένα μοντέλα που βασίζονταν σε ασαφή νευρωνικά δίκτυα για χρονικούς ορίζοντες μεγαλύτερους από 15 ώρες ωφελούνται περισσότερο από το φαινόμενο ομαλοποίησης παρά από την persistence ή την OL-persistence. Παρόλα αυτά, για χρονικό ορίζοντα μεταξύ 1 και 5 ωρών, η persistence είναι το μόνο μοντέλο που επωφελείται από τα φαινόμενα ομαλοποίησης, και συνεπώς στις τοπικές προβλέψεις, είναι δύσκολο να ξεπεραστεί η persistence σε αυτού του είδους χρονικούς ορίζοντες.

Οι Siebert και Καρινιωτάκης αξιολόγησαν την επίδραση της επιλογής των εισόδων (αριθμός αιολικών πάρκων αναφοράς) στην ακρίβεια των τοπικών προβλέψεων. Σε πρώτη φάση, ελέγχθηκαν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί  $2n-1$  για  $n$  αιολικά πάρκα αναφοράς. Οι προβλέψεις μεμονωμένων αιολικών πάρκων συνδυάστηκαν γραμμικά ώστε να παράγουν την τοπική πρόβλεψη. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο αυξανόμενος αριθμός των αιολικών πάρκων αρχικά μειώνει το σφάλμα, παρόλα αυτά, αφού προστεθεί ένας συγκεκριμένος αριθμός αιολικών πάρκων, το σφάλμα ξεκινά να αυξάνεται. Ο συγγραφέας αναγνώρισε, επίσης, την ανάγκη σχεδιασμού προσαρμοζόμενων μοντέλων τοπικών προβλέψεων για την αντιμετώπιση της μη στατικής διαδικασίας.

Οι Bremen et al. πρότειναν μια υβριδική φυσική-στατιστική μέθοδο που βασίζεται στην ανάλυση πρωταρχικών συνιστωσών, η οποία είναι μια μαθηματική διαδικασία που μετατρέπει έναν αριθμό από πιθανώς συσχετιζόμενες μεταβλητές σε έναν μικρότερο αριθμό από μη-συσχετιζόμενες μεταβλητές που ονομάζονται πρωταρχικές συνιστώσες. Οι

συγγραφείς έδειξαν ότι η χωρική αποσύνθεση της παραγωγής της αιολικής ισχύος μπορεί να εκτελεστεί με ανάλυση των πρωταρχικών συνιστωσών ώστε να βγει ένα προσχέδιο της μεταβλητότητας. Την ίδια στιγμή, οι πρωταρχικές συνιστώσες μπορούν να συνδεθούν με τυπικές καιρικές συνθήκες. Σε αυτή τη μέθοδο, υπολογίζονται χάρτες με τις προβλεπόμενες αιολικές ταχύτητες στο τετράγωνο και πολλαπλασιασμένες με την κανονικοποιημένη χωρική κατανομή της ικανότητας παραγωγής αιολική ισχύος στις υποπεριοχές. Στην περίπτωση της Γερμανίας, αυτοί οι χάρτες δίνονται σε ένα πλέγμα από 306 υποπεριοχές. Αρχικά, γίνονται αναλύσεις των πρωταρχικών συνιστωσών με τη χρήση ιστορικών δεδομένων από τους προβλεπόμενους αιολικούς χάρτες και έπειτα υπολογίζονται οι πρωταρχικές συνιστώσες. Οι έξι πρώτες συνιστώσες χρησιμοποιούνται μαζί με την συνολική παραγωγή σε μια γραμμική παλινδρόμηση πολλών μεταβλητών και υπολογίζονται οι συντελεστές. Οι προβλέψεις γίνονται χρησιμοποιώντας τις προβλέψεις της αιολικής ταχύτητας από το ECMWF ώστε να φτιαχτούν οι προβλεπόμενοι χάρτες, οι οποίοι προβάλλονται μετά στις πρώτες έξι διαστάσεις που ορίστηκαν από την διαδικασία ανάλυσης πρωταρχικών συνιστωσών πάνω σε ιστορικά δεδομένα. οι προβαλλόμενες τιμές δίνονται, έπειτα, στο μοντέλο πολλών μεταβλητών ώστε να ανακτηθεί η τελικά τοπική πρόβλεψη.

Η απόδοση αυτής της μεθόδου είναι παρόμοια με την απόδοση των μοντέλων «state-of-art». Το NRMSE μιας μέρας μπροστά είναι 4.4% της ονομαστικής ισχύος.

## 7.2 Λειτουργικά και εμπορικά μοντέλα προβλέψεων αιολικής ισχύος

### *Prediktor*

Ο Landberg ανέπτυξε ένα φυσικό σύστημα προβλέψεων αιολικής ισχύος στο Risø National Laboratory (Δανία), το οποίο βασίζεται εν μέρει στην εμπειρία που αποκτάται κατά την ανάπτυξη του Ευρωπαϊκού Χάρτη Ανέμων. Το κύριο αντικείμενο του συστήματος είναι η χρήση της αιολικής ταχύτητας και κατεύθυνσης από τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού, η μετατροπή αυτών των μεταβλητών ανάλογα με την τοπική θέση και τελικώς, η χρήση της καμπύλης ισχύος, συμπεριλαμβανομένου των φαινομένων αφύπνισης. Η στατιστική μονάδα MOS χρησιμοποιείται πριν την μετατροπή σε τοπικό άνεμο ή πριν την μετατροπή σε ισχύ. Μπορεί, επίσης, να χρησιμοποιηθεί στο τέλος της αλυσίδας διαδικασιών του μοντέλου για να γίνει η αλλαγή της ισχύος.

Το μοντέλο περιλαμβάνει τέσσερεις κύριες συνιστώσες:

1. Δεδομένα αιολικής ταχύτητας και κατεύθυνσης από ένα μοντέλο αριθμητικών προβλέψεων καιρού,
2. Διόρθωση ύψους,
3. Διόρθωση των τοπικών φαινομένων (ορεογραφία και τραχύτητα) και
4. Τυποποίηση της καμπύλης αιολικής ισχύος, συμπεριλαμβανομένου των δεδομένων αφύπνισης.

Το μοντέλο HIRLAM χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη των καιρικών μεταβλητών. Αυτές οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού τροποποιούνται χρησιμοποιώντας τον γεωστροφικό νόμο αντίστασης και το λογαριθμικό προφίλ του ανέμου ώστε να παράγει μια εκτίμηση της επιφανειακής αιολικής ταχύτητας και κατεύθυνσης. Μετά, αυτές οι τροποποιημένες μεταβλητές διορθώνονται ανάλογα για τα τοπικά φαινόμενα χρησιμοποιώντας το μοντέλο WAsP από το Risø. Το μοντέλο WAsP τροποποιεί το τοπικό πεδίο του ανέμου ανάλογα με τις επιδράσεις των εμποδίων (σπίτια, διακοπές ανέμου, κλπ) και τις επιδράσεις της επιφανειακής τραχύτητας και ορεογραφίας.

Το μοντέλο Risø PARK έπειτα, εφαρμόζεται για την εξομοίωση των φαινομένων σκίασης σε κάθε ανεμογεννήτρια ατομικά. Αυτό το μοντέλο οδηγεί στην αύξηση της αποδοτικότητας του αιολικού πάρκου και έπειτα, αναγνωρίζει την μείωση της εξόδου της ανεμογεννήτριας που προκαλείται από τις αφυπνίσεις των άλλων ανεμογεννητριών. Η ισχύς εξόδου του αιολικού πάρκου βασίζεται στην υπολογισμένη αποδοτικότητα της διάταξης για κάθε κατεύθυνση του ανέμου. Επιπλέον, οι τοπικές διορθώσεις γίνονται στην τοπική ταχύτητα του ανέμου και στην κατεύθυνση και στην υπολογισμένη αιολική παραγωγή. Για αυτό, τα δεδομένα παραγωγής της αιολικής ισχύος και οι πηγές των ιστορικών δεδομένων για τον άνεμο χρησιμοποιούνται για να ρυθμίσουν το μοντέλο.

Για τον υπολογισμό των επιπτώσεων που δεν υπολογίζονται από τα φυσικά μοντέλα, εφαρμόζεται μια ρύθμιση MOS (Model Output Statistics). Πρώτα, εφαρμόζονται οι MOS διορθώσεις στην μορφή απλών γραμμικών συναρτήσεων, στις προβλέψεις της ταχύτητας του τοπικού ανέμου. Στην δεύτερη MOS, γίνονται οι διορθώσεις σε όποιες άλλες σταθερές υπάρχουν στις προβλέψεις της ισχύος εξόδου. Το μοντέλο δοκιμάστηκε στο Electricity Supply Board (ESB) στην Ιρλανδία και στην Αιόβα. Εκεί, η χρήση του μοντέλου στατιστικής διόρθωσης απόκρισης ήταν απαραίτητη για τις προβλέψεις του δικτυωτού πλεγματοκού μοντέλου της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής. Για αυτό το γεγονός, ήταν εν μέρει υπεύθυνο το γεγονός ότι η ανάλυση του δικτυωτού πλεγματοκού μοντέλου ήταν 170 χλμ, και δεν υπήρχε διαθέσιμη τοπική Ανάλυση WAsP.

Το μοντέλο Prediktor δοκιμάστηκε στην Καλιφόρνια. Οι δοκιμές ελέγχονταν από το ινστιτούτο Electric Power Research Institute (EPRI) και επιδοτήθηκαν από την Ενεργειακή Επιτροπή της Καλιφόρνιας. Το μοντέλο διεξήγαγε προβλέψεις για δύο μεγάλες περιοχές με αιολικά πάρκα: 900 ανεμογεννήτριες που παρήγαν 90 MW στο Altamont Pass και 111 ανεμογεννήτριες που παρήγαν 66,6 MW στο San Geronimo Pass. Το Prediktor πέτυχε ένα μέσο ετήσιο MAE 14.2% και 23.3% για τα αντίστοιχα εργοστάσια, για μια περίοδο ενός χρόνου.

#### *Previento*

Ένα φυσικό μοντέλο που χρησιμοποιεί αριθμητικές προβλέψεις καιρού σαν εισόδους αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο του Oldenburg, και διανέμεται στις μέρες μας από το Energy & Meteo Systems GmbH (EMSYS). Λειτουργεί σε παραλιακές τοποθεσίες της Γερμανίας για πολλά χρόνια. Βασίζεται στην ίδια αρχή με το μοντέλο Prediktor όσον αφορά την βελτίωση των αριθμητικών προβλέψεων καιρού της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου.

Χρησιμοποιεί το DWD's Lokalmodell (LM) σαν το μοντέλο αριθμητικών προβλέψεων καιρού μέχρι και 48 ώρες.

Ο Mönnich βρήκε ότι το πιο σημαντικό υπο-μοντέλο που χρησιμοποιείται στις μέρες μας είναι το μοντέλο για την ατμοσφαιρική ευστάθεια. Τα υπο-μοντέλα για την ορεογραφία και την τραχύτητα δεν ήταν πάντα ικανά να βελτιώσουν τα αποτελέσματα. Η χρήση του μοντέλου στατιστικής διόρθωσης απόκρισης (MOS) κρίθηκε πολύ χρήσιμη, παρόλα αυτά επειδή το μοντέλο αριθμητικών προβλέψεων καιρού άλλαζε συχνά, η χρήση μια αναδρομικής τεχνικής συνίσταται. Είχε μεγάλη επιρροή στην καμπύλη ισχύος, και η θεωρητική καμπύλη ισχύος που δόθηκε από τον κατασκευαστή και η καμπύλη ισχύος που βρέθηκε με τα δεδομένα μπορεί να είναι αρκετά διαφορετικές. Στην πραγματικότητα, ακόμα και η καμπύλη ισχύος που εκτιμήθηκε από τα δεδομένα διαφορετικών χρόνων μπορεί να δείξει σημαντικές αλλαγές. Τελικά, διευκρινίστηκε ότι η μεγαλύτερη επιρροή στο σφάλμα προήλθε από το ίδιο το μοντέλο αριθμητικών προβλέψεων καιρού.

#### *LocalPred και RegioPred*

Τα LocalPred και RegioPred είναι δύο εργαλεία που ανεπτύχθησαν από το CENER, το Ισπανικό Εθνικό Κέντρο Ανανεώσιμης Ενέργειας, σε συνεργασία με το Ισπανικό Κέντρο Έρευνας για την Ενέργεια, το Περιβάλλον και την Τεχνολογία, CIEMAT. Τα μοντέλα που λειτουργούν από το 2002 και «τρέχουν» για διαφορετικά αιολικά πάρκα στην Ισπανία από τον Ιούνιο του 2003.

Το RegioPred είναι ένα μοντέλο τοπικών προβλέψεων που βασίζεται στο μοντέλο πρόβλεψης για ένα αιολικό πάρκο, LocalPred. Η τοπική πρόβλεψη μπορεί να διεξαχθεί προσθέτοντας κάθε πρόβλεψη ενός αιολικού πάρκου ή χρησιμοποιώντας την ανάλυση ομαδοποίησης για επιλεγμένα αιολικά πάρκα αναφοράς.

Το μοντέλο LocalPred αναπτύχθηκε συγκεκριμένα για την πρόβλεψη σε αιολικά πάρκα με περίπλοκα εδάφη. Περιλαμβάνει μια προσαρμοζόμενη βελτιστοποίηση της εισόδου αριθμητικών προβλέψεων καιρού, μια τυποποίηση χρονοσειρών, μια τυποποίηση μεσαίας κλίμακας με το μοντέλο MM5 και μοντελοποίηση με την καμπύλη ισχύος. Οι προβλέψεις του MM5 αφορούν όλες τις σχετικές μετεωρολογικές μεταβλητές για 72 ώρες με χωρική ανάλυση 1 τετραγωνικού χλμ γύρω από το αιολικό πάρκο. Εξαιτίας της χωρικής ανάλυσης, αυτή η βελτίωση είναι πιο σημαντική σε περίπλοκα εδάφη.

Η Υπολογιστική Δυναμική των Ρευστών συνδυάστηκε με το μοντέλο MM5 ώστε να συμπεριληφθεί και μοντελοποίηση μικρότερης κλίμακας (μικρότερης από 1 τετρ.χλμ.). Αυτό το μοντέλο παίρνει τις προβλέψεις του MM5, την τοπογραφία και την τραχύτητα σαν εισόδους ώστε να τροποποιηθούν οι προβλέψεις, και αυξάνει την χωρική ανάλυση μέχρι σε μέτρα. Ένα MOS χρησιμοποιείται για την εξουδετέρωση των συστηματικών σφαλμάτων των αριθμητικών προβλέψεων καιρού. Αυτό το μοντέλο βασίζεται σε έναν αλγόριθμο ασαφούς λογικής με αυτό-ρύθμιση. Μετά την MOS διόρθωση, παράγεται μια βελτιωμένη αριθμητική πρόβλεψη καιρού. Έπειτα οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού μετατρέπονται σε ισχύ από ένα στατιστικό μοντέλο W2P για κάθε κατεύθυνση και πυκνότητα του αέρα. Είναι δυνατό να



χρησιμοποιηθούν διαφορετικοί μέθοδοι W2P βασιζόμενοι σε διάφορες καταστάσεις που σχετίζονται με τις διαθέσιμες μετρήσεις που έγιναν στο αιολικό πάρκο. Για πολύ βραχυπρόθεσμες προβλέψεις (π.χ. μέχρι και 10 ώρες μπροστά), το σύστημα χρησιμοποιεί τεχνικές αυτό-παλινδρόμησης. Χρησιμοποιούνται δύο γραμμικά μοντέλα ARMA, το ένα για δεδομένα αιολικής ταχύτητας και το άλλο για τα δεδομένα παραγωγής. Και τα δύο είναι μοντέλα αυτό-παλινδρόμησης πρώτης τάξεως.

### *WPPT σύστημα*

Το εργαλείο πρόβλεψης αιολικής ισχύος (Wind Power Prediction Tool, WPPT) αναπτύχθηκε από το Ινστιτούτο Informatics and Mathematical Modelling (IMM) του Πολυτεχνείου της Δανίας (DTU). Το WPPT είναι ένα σύστημα πρόβλεψης που είναι ικανό να προβλέψει για ένα μόνο αιολικό πάρκο, για μια ομάδα αιολικών πάρκων ή για μια ευρεία περιοχή.

Η πρόβλεψη του μοντέλου για ολόκληρη την περιοχή διεξάγεται με δεδομένα σε κατάσταση λειτουργίας τα οποία καλύπτουν μόνο τα αιολικά πάρκα αναφοράς στην περιοχή. Η μέθοδος αποτελείται από τον διαχωρισμό της περιοχής σε υποπεριοχές, κάθε μία από τις οποίες εκπροσωπείται από ένα αιολικό πάρκο. Οι προβλέψεις από κάθε αιολικό πάρκο αναβαθμίζονται ώστε να καλύψουν όλη την παραγωγή της υποπεριοχής. Έπειτα, οι προβλέψεις κάθε υποπεριοχής συνδυάζονται ώστε να δώσουν την πρόβλεψη για όλη την περιοχή. Το μοντέλο αυτό μπορεί να προβλέψει με επιτυχία για χρονικούς ορίζοντες μέχρι και 48 ωρών, ανάλογα με τον χρονικό ορίζοντα πρόβλεψης της αριθμητικής πρόβλεψης καιρού. Η ανάλυση είναι συνήθως 30 λεπτά.

Οι είσοδοι του συστήματος πρόβλεψης της αιολικής ισχύος είναι οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού για την περιοχή και τα αιολικά πάρκα αναφοράς, οι μετρήσεις της παραγωγής σε κατάσταση λειτουργίας (ενημερώνονται κάθε 5 λεπτά με 1 ώρα) και οι μετρήσεις των κλιματικών μεταβλητών στις τοποθεσίες των αιολικών πάρκων αναφοράς (είσοδος κατ' επιλογήν). Η ονομαστική ισχύς και οι χρόνοι λειτουργίας των αιολικών πάρκων αναφοράς και μη, όπως επίσης οι ομαδοποιημένες ενεργειακές παρατηρήσεις από όλες τις ανεμογεννήτριες της περιοχής (ενημερώνονται με μια καθυστέρηση 3 με 5 βδομάδων), είναι επίσης είσοδοι του συστήματος.

Μία μέθοδος δύο κλάδων χρησιμοποιείται για να προβλέψει για μια ολόκληρη περιοχή. Στον πρώτο κλάδο, οι προβλέψεις για τα αιολικά πάρκα αναφοράς της υποπεριοχής  $i$  διεξάγονται με μετρήσεις εντός λειτουργίας και με αριθμητικές προβλέψεις καιρού, έπειτα οι προβλέψεις για τα αιολικά πάρκα αναφοράς της υποπεριοχής  $i$  αθροίζονται και αναβαθμίζονται για τον υπολογισμό της συνολικής παραγωγής της υποπεριοχής  $i$  και τέλος η συνολική παραγωγή για ολόκληρη την περιοχή ανακτάται αθροίζοντας την παραγωγή της κάθε υποπεριοχής. Στον δεύτερο κλάδο, η πρόβλεψη της κάθε υποπεριοχής  $i$  υπολογίζεται κατευθείαν από τις μετρήσεις εκτός λειτουργίας της συνολικής παραγωγής της υποπεριοχής και την αριθμητική πρόβλεψη καιρού της περιοχής, και τελικά η συνολική παραγωγή για όλη την περιοχή εξάγεται από το άθροισμα της παραγωγής κάθε υποπεριοχής. Το τελικό σύνολο της παραγωγής είναι ένας σταθμισμένος μέσος των προβλέψεων που ήταν αποτέλεσμα των δύο κλάδων.



Ένα κεντρικό κομμάτι αυτού του συστήματος είναι το γεγονός ότι παρέχει στατιστικά μοντέλα για τις βραχυπρόθεσμες προβλέψεις της αιολικής παραγωγής των αιολικών πάρκων της περιοχής. Χρησιμοποιούνται εξαρτημένα παραμετρικά μοντέλα, τα οποία περιγράφουν την σχέση μεταξύ των μετεωρολογικών μεταβλητών (ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου) και της μετρούμενης παραγωγής των αιολικών πάρκων και της περιοχής. Αυτές οι συναρτήσεις ονομάζονται μοντέλα καμπύλων ισχύος που εξαρτώνται από την κατεύθυνση. Τέσσερα διαφορετικά μοντέλα χρησιμοποιούνται από τους δύο κλάδους για να προβλέψουν την αιολική ισχύ:

- Ένα μοντέλο αιολικού πάρκου, που χρησιμοποιεί τις εξαρτώμενες από την κατεύθυνση του ανέμου καμπύλες ισχύος στην μετατροπή των αριθμητικών προβλέψεων καιρού σε ισχύ. Η έξοδος των μοντέλων του πρώτου κλάδου προσαρμόζονται από ένα μοντέλο που λαμβάνει υπ' όψιν την αυτοσυσχέτιση και τις ημερήσιες μεταβολές.
- Ένα μοντέλο αναβάθμισης, στο οποίο η παραγωγή της υποπεριοχής λαμβάνεται μέσω του πολλαπλασιασμού του αθροίσματος των προβλέψεων των αιολικών πάρκων αναφοράς της υποπεριοχής, χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση αναβάθμισης που σχετίζεται με τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού της περιοχής.
- Ένα μοντέλο περιοχής, που μετατρέπει τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού και τις μετρήσεις εκτός λειτουργίας για μια περιοχή, με μια μέθοδο που είναι παρόμοια με την μέθοδο του μοντέλου αιολικού πάρκου.
- Ένα συνολικό μοντέλο, που συνδυάζει τις προβλέψεις των δύο κλάδων με έναν σταθμισμένο μέσο που εξαρτάται από τον χρόνο, χρησιμοποιώντας σαν κριτήριο στάθμισης το σφάλμα RMSE.

Μιας και η αιολική παραγωγή είναι μια μη στατική διαδικασία, εφαρμόζεται μια χρόνο-προσαρμοζόμενη και αναδρομική μέθοδος εκτίμησης. Εξαιτίας της χρονικής προσαρμοστικότητας της εκτίμησης, το σύστημα πρόβλεψης είναι ικανό να προσαρμόζεται στις μεταβολές, όπως οι μεταβολές στην τριγύρω βλάστηση ή στα μοντέλα αριθμητικών προβλέψεων καιρού. Οι παλιές πληροφορίες αχρηστεύονται όταν γίνονται διαθέσιμες οι νέες πληροφορίες, υποβαθμίζοντας τις παλιές πληροφορίες με έναν συντελεστή λήθης. Οι παράμετροι υπολογίζονται αναδρομικά χρησιμοποιώντας τα αναδρομικά ελάχιστα τετράγωνα.

Η έξοδος του συστήματος WPPT περιλαμβάνει μια εκτίμηση της αβεβαιότητας για ολόκληρο τον χρονικό ορίζοντα. Τα προβλεπόμενα σημεία της κατανομής πιθανότητας της παραγωγής υπολογίζονται κατ' εκτίμηση χρησιμοποιώντας τρεις μεθόδους: την προσαρμοζόμενη εκτίμηση μεταβλητότητας, τα σημεία που βασίζονται στο σύνολο, και την παλινδρόμηση σημείων.

Το μοντέλο λειτουργεί τώρα στο Eltra/Energinet.dk (λειτουργικό σύστημα στο δυτικό μέρος της Δανίας), Elsam (συνδυασμός θερμότητας και ισχύος (CHP) και ιδιοκτήτης αιολικού πάρκου στην δυτική Δανία), Elkraft (λειτουργικό σύστημα της ανατολικής Δανίας) και E2 (CHP και ιδιοκτήτης αιολικού πάρκου στην ανατολική Δανία).

### *Zephyr*

Οι μέθοδοι του WPPT και του Prediktor συνδυάστηκαν και επεκτάθηκαν και το αποτέλεσμα ήταν η μέθοδος Zephyr. Το αντικείμενο αυτής της μεθόδου είναι να συγχωνεύσει τα πλεονεκτήματα και των δύο συστημάτων. Σε αυτό το μοντέλο, κάθε αιολικό πάρκο έχει ένα μοντέλο πρόβλεψης ανάλογα με τα διαθέσιμα δεδομένα. Για παράδειγμα, αν οι μόνες πληροφορίες που είναι διαθέσιμες για το αιολικό πάρκο είναι ο αριθμός, ο τύπος και η θέση των ανεμογεννητριών, τότε το μοντέλο που χρησιμοποιείται είναι ένα απλοποιημένο Prediktor με χρήση μόνο των αριθμητικών προβλέψεων καιρού σαν είσοδο. Παρόλα αυτά, αν είναι διαθέσιμα όλα τα δεδομένα (συμπεριλαμβανομένου και των δεδομένων σε κατάσταση λειτουργίας) για το αιολικό πάρκο, τότε χρησιμοποιούνται τα στατιστικά μοντέλα του WPPT.

Οι πιο πρόσφατες έρευνες σε αυτό το σύστημα περιλαμβάνει τις παραμέτρους ευστάθειας, την μοντελοποίηση μεσαίας κλίμακας και τις συνολικές προβλέψεις.

### *ARMINES*

Το AWPPS σύστημα αιολικής πρόβλεψης του ARMINES ενσωματώνει:

- Βραχυπρόθεσμα μοντέλα: βασίζονται στην στατιστική προσέγγιση χρονοσειρών, η οποία είναι ικανή να προβλέψει αποτελεσματικά την αιολική ισχύ για χρονικούς ορίζοντες μέχρι και 10 ώρες μπροστά.
- Μακροπρόθεσμα μοντέλα: βασίζονται σε ασαφή νευρωνικά δίκτυα που μπορούν να προβλέψουν την έξοδο του αιολικού πάρκου μέχρι και 72 ώρες μπροστά. Αυτά τα μοντέλα λαμβάνουν SCADA δεδομένα εν λειτουργία και αριθμητικές προβλέψεις καιρού σαν εισόδους.
- Συνδυαστικές προβλέψεις: παράγονται από την στάθμιση των βραχυπρόθεσμων και των μακροπρόθεσμων προβλέψεων. Ο στόχος είναι να επιτευχθεί η βέλτιστη απόδοση για όλο τον ορίζοντα πρόβλεψης.
- Μοντέλο αναβάθμισης: βασίζεται σε δυναμικά ασαφή νευρωνικά δίκτυα και αποτελείται από την διαδοχική προσέγγιση και την προσέγγιση ομαδοποίησης με μοντέλα αντιπροσωπευτικών αιολικών πάρκων. Το κριτήριο για την επιλογή των αιολικών πάρκων αναφοράς είναι η συσχέτιση με την συνολική παραγωγή. Υπάρχει 50% βελτίωση συγκριτικά με την εντός λειτουργίας persistence.
- Εκτίμηση αβεβαιότητας: η εκτίμηση των διαστημάτων εμπιστοσύνης βασίζεται στην προσαρμοζόμενη προσέγγιση επανα-δειγματοποίησης. Επιπλέον, η προσέγγιση εκτελείται για την εν λειτουργία εκτίμηση της αβεβαιότητας της πρόβλεψης, χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα ρίσκα πρόβλεψης ανάλογα με την σταθερότητα του καιρού.

Το σύστημα πρόβλεψης AWPPS ολοκληρώνεται με το λογισμικό MORE-CARE EMS. Εγκαταστάθηκε για χειρισμό εντός λειτουργίας στα συστήματα ισχύος της Κρήτης και της Μαδέρας.

Στις μέρες μας, το σύστημα MORE-CARE εγκαταστάθηκε στην Κρήτη, διαχειρίζεται από την Δ.Ε.Η. και παρέχει προβλέψεις αιολικής ισχύος για όλα τα αιολικά πάρκα για ορίζοντα 48 ωρών μπροστά. Αυτές οι προβλέψεις βασίζονται σε αριθμητικές προβλέψεις καιρού που δίνονται από το σύστημα SKIRON, το οποίο αναπτύχθηκε από το Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο της Αθήνας και διαχειρίζεται από το Ινστιτούτο Επιταχυντικών Συστημάτων και Εφαρμογών.

Τα εν λειτουργία δεδομένα παρέχονται από το σύστημα SCADA του νησιού. Στην Πορτογαλία, το MORE-CARE σύστημα διαχειρίζεται από το EEM (Empresa de Electricidade da Madeira) και παρέχει προβλέψεις της αιολικής παραγωγής του νησιού της Μαδέρας. Παρέχει βραχυπρόθεσμες προβλέψεις για μέχρι και 8 ώρες μπροστά χρησιμοποιώντας SCADA εν λειτουργία δεδομένα σαν είσοδο.

#### *Το WPMS σύστημα*

Από το 2000, το ISET (Institut für Solare Energieversorgungstechnik) λειτουργεί για βραχυπρόθεσμες προβλέψεις, χρησιμοποιώντας το μοντέλο DWD και νευρωνικά δίκτυα. Το μοντέλο WPMS διεξάγει τις παρακάτω διεργασίες: 1. Υπολογισμό της πρόσφατη αιολική παραγωγή της ελεγχόμενης περιοχής και των υποπεριοχών, η οποία υπολογίζεται από όλα τα αιολικά πάρκα χρησιμοποιώντας μετρήσεις μόνο μερικών πάρκων, 2. Βραχυπρόθεσμες προβλέψεις και προβλέψεις μια μέρας μπροστά για τα αιολικά πάρκα ατομικά, για την ελεγχόμενη περιοχή και τις υποπεριοχές.

Το WPMS χρησιμοποιείται, στις μέρες μας, από τέσσερις γερμανικούς διαχειριστές συστήματος (E.ON Netz, Vattenfall Europe Transmission, EnBW Transportnetze AG και RWE Transportnetz Strom), τον διαχειριστή συστήματος της Αυστρίας και της Ιταλίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΧΡΗΜΑΤΙΣΤΗΡΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

---

### 8.1 Εισαγωγή

Καθώς η αγορά ενέργειας εξελίσσεται, η πρόβλεψη παραγωγής θα παίζει πολύ σημαντικό ρόλο και σε αυτό το τομέα και ειδικά με την δημιουργία πλέον του Χρηματιστηρίου Ενέργειας. Το Χρηματιστήριο Ενέργειας αποτελεί προϋπόθεση για την αναδιοργάνωση της χονδρεμπορικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, προς όφελος των συμμετεχόντων στην αγορά και των τελικών καταναλωτών, καθώς στοχεύει:

1. στη σύζευξη της ελληνικής αγοράς με τις υπόλοιπες ευρωπαϊκές αγορές.
2. στην ενίσχυση του ανταγωνισμού και της διαφάνειας, με άμεσα οφέλη στη μείωση του ενεργειακού κόστους και τη διασφάλιση καλύτερων τιμών για τα νοικοκυριά και τις επιχειρήσεις.
3. την εξασφάλιση της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού, τη διαφοροποίηση των πηγών ενέργειας στο ενεργειακό μίγμα, καθώς και την περαιτέρω αύξηση της συμμετοχής των ΑΠΕ.

Με τις διατάξεις που περιλαμβάνει το πολυνομοσχέδιο, τροποποιείται ο Ν. 4425/2016 για την αναδιοργάνωση της ελληνικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, σε εφαρμογή των Ευρωπαϊκών Κανονισμών και Οδηγιών για την ολοκλήρωση της ενιαίας ευρωπαϊκής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, το λεγόμενο «Μοντέλο Στόχο» (Target Model).

Το Target Model προσδιορίζει τις ελάχιστες απαιτούμενες προδιαγραφές που θα πρέπει να ακολουθήσουν οι επιμέρους εθνικές αγορές ανά την Ευρώπη, και η δική μας, ώστε να διαμορφώσουν μια κοινή αρχιτεκτονική λειτουργίας η οποία θα οδηγήσει ακολούθως στην σύζευξη των αγορών της ΕΕ και στην ενθάρρυνση ανοικτού και δίκαιου ανταγωνισμού προς το συμφέρον του τελικού καταναλωτή. Ο βασικός στόχος της αναδιάρθρωσης της αγοράς Η/Ε είναι η μείωση του ενεργειακού κόστους και η ενίσχυση της ασφάλειας εφοδιασμού, μέσω της αποτελεσματικής διαμόρφωσης και σταδιακής σύγκλισης της τιμής προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση (1) μηχανισμών όπως το ενεργειακό χρηματιστήριο και (2) ενίσχυση και διεύρυνση των διασυνδέσεων μεταξύ των κρατών μελών. Οι διατάξεις που περιέχει το πολυνομοσχέδιο διαμορφώνουν το θεσμικό πλαίσιο για τη λειτουργία του ενεργειακού χρηματιστηρίου.

Το Target Model έχει ως βασική επιδίωξη την εξισορρόπησης προσφοράς και ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας σε πραγματικό χρόνο, ώστε να αποφεύγονται μη αποδοτικές λύσεις για κάλυψη αιχμών φορτίου ή στοχαστικών διακυμάνσεων των ΑΠΕ. Η δημιουργία μιας διευρυμένης αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας που θα λειτουργεί με κοινούς κανόνες παράλληλα με το διασυνοριακό εμπόριο, επιτρέπουν ανά πάσα στιγμή το έλλειμμα που μπορεί να προκύψει προσωρινά σε μία χώρα να αντισταθμίζεται από το πλεόνασμα μιας άλλης χώρας με όρους αγοράς. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται η επάρκεια εφοδιασμού αλλά και ένα χαμηλότερο ενεργειακό κόστος, με στόχο τη σταδιακή σύγκλιση των τιμών ενέργειας της ενιαίας ευρωπαϊκής αγοράς. Η συντονισμένη και συγχρονισμένη προσέγγιση αμβλύνει τις

διαφοροποιήσεις των τιμών μεταξύ των αγορών και προκαλεί πιο αποτελεσματικές ροές ενέργειας, ισχυρότερα συσχετισμένες με τα οικονομικά σήματα.

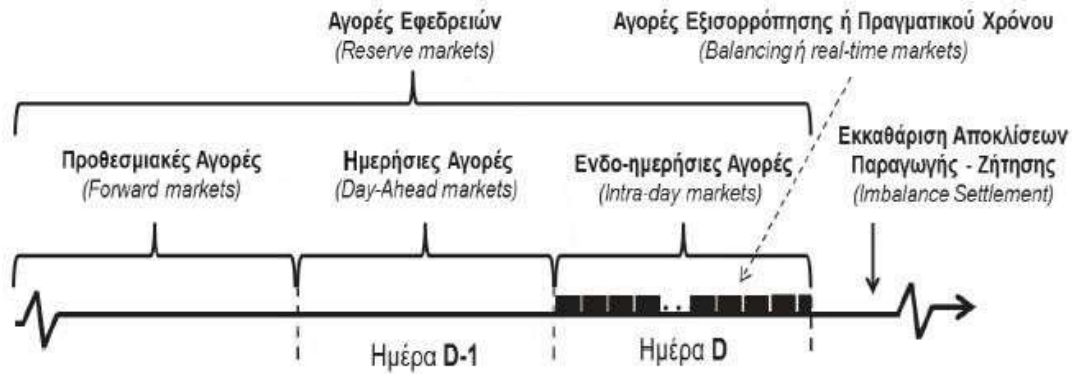
Υπάρχει μια ενιαία πλατφόρμα δημοπρασιών (single auction platform), στην οποία υποβάλλονται καθημερινά προσφορές για πώληση και αγορά ηλεκτρικής ενέργειας για την επόμενη ημέρα (day-ahead market) καθώς και την ενδοημερήσια αγορά (intraday market). Το αποτέλεσμα αυτής της ενιαίας επίλυσης σε πανευρωπαϊκή κλίμακα, είναι η κατανομή της ενέργειας μεταξύ των διαφόρων διεθνών διασυνδέσεων με έναν τρόπο αρκετά αποτελεσματικό που αξιοποιεί στο μέγιστο δυνατό την χωρητικότητα των διασυνδέσεων, προκειμένου οι τιμές μεταξύ των συζευγμένων αγορών να καθίστανται ίσες και να διαφοροποιούνται μόνο στην περίπτωση συμφόρησης στην μεταξύ τους διασύνδεση, το οποίο θα μπορεί να ερμηνευτεί και ως ένα οικονομικό σήμα για την αναγκαιότητα περαιτέρω διασυνδέσεων.

Στο παρελθόν, οι έμποροι ηλεκτρικής ενέργειας (traders) λάμβαναν μέρος σε διακριτές δημοπρασίες (explicit auctions) για την κατανομή ημερήσιων διασυνδετικών δικαιωμάτων και επομένως έπρεπε να προβλέψουν τη διαφορά των τιμών μεταξύ των διασυνδεδεμένων αγορών. Σε περίπτωση εσφαλμένης πρόβλεψης, αν δηλαδή είχαν αντιστραφεί εν τέλει τα οικονομικά δεδομένα και επομένως δεν υπήρχε οικονομικό νόημα στις διασυνοριακές συναλλαγές, ένα μεγάλο ποσοστό τους δεν υλοποιούνταν. Έτσι, σημαντικό τμήμα των διεθνών διασυνδέσεων παρέμενε στην πράξη αναξιοποίητο.

Οι περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες από την Πορτογαλία έως την Φινλανδία, συμπεριλαμβανομένης της Μεγάλης Βρετανίας, έχουν ήδη ενοποιήσει τις προημερήσιες χονδρεμπορικές αγορές ηλεκτρικής ενέργειας. Ο ρυθμός των εξελίξεων και στη Βαλκανική είναι ενθαρρυντικός. Οι χώρες της Ενεργειακής Κοινότητας έχουν ήδη δεσμευτεί για τη σύζευξη των αγορών τους με μια τουλάχιστον όμορη χώρα έως τα μέσα του 2018. Σημειώνεται ενδεικτικά ότι η ΠΓΔΜ έχει ανακοινώσει την επικείμενη σύζευξή της με τη Βουλγαρία. Εν συνεχεία της ίδρυσης χρηματιστηρίων ενέργειας στη Σερβία και τη Βουλγαρία, ήδη από το 2015, σε αντίστοιχες ενέργειες προβαίνει και το Μαυροβούνιο, ενώ η Αλβανία διεξάγει το σχεδιασμό της από κοινού με το Κόσοβο. Σημειώνεται επίσης ότι έως το 2020, η Βουλγαρία προτίθεται να ενοποιηθεί με τις 4 ήδη συζευγμένες αγορές της Ουγγαρίας, Τσεχίας, Σλοβακίας και Ρουμανίας.

Στην περίπτωση της Ελλάδας, η προ-ημερήσια αγορά μας θα συζευχθεί με την Ιταλία και αργότερα τη Βουλγαρία, αλλά και όμορες χώρες της Ενεργειακής Κοινότητας, ανάλογα με τον βαθμό ετοιμότητάς τους.

Το Target Model θα ενισχύσει σημαντικά και τις βιομηχανίες καθώς αφενός θα διαμορφωθούν οικονομικά προσιτές τιμές ενέργειας αφετέρου θα μπορούν και οι ίδιες να συμμετέχουν στην αγορά συνάπτοντας συμβόλαια με παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας κάνοντας αντιστάθμιση και ελέγχοντας πλήρως το ενεργειακό κόστος σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα.



Σχήμα 8.1: Χρονική αλληλουχία ευρωπαϊκών αγορών ενέργειας

## 8.2 Συνοπτική περιγραφή αγορών στο νέο μοντέλο

Τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή δεν έχουν ακόμη εκδοθεί τα τεχνικά εγχειρίδια και οι κώδικες των νέων αγορών που θα προκύψουν με την εφαρμογή του νόμου 4225/2016 τον Ιούνιο του 2018. Ωστόσο, χρησιμοποιώντας ως οδηγό τη μελέτη με τίτλο «Βασικές Αρχές Σχεδιασμού και Χρονοδιάγραμμα Ενεργειών για την Προσαρμογή της Εγχώριας Αγοράς Ηλεκτρισμού στις Απαιτήσεις του Target Model», που ανατέθηκε από την ΡΑΕ σε διεθνή σύμβουλο, είναι δυνατή η κατανόηση του ρόλου, των δυνατοτήτων και των υποχρεώσεων των ΑΠΕ και των υπολοίπων πηγών παραγωγής ενέργειας, μέσα στο νέο περιβάλλον που έχει αρχίσει να διαμορφώνεται.

### 8.2.1 Χονδρική αγορά προθεσμιακών προϊόντων ηλεκτρικής ενέργειας

Κατά την πρώτη φάση εφαρμογής του νέου μοντέλου οργάνωσης της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, θα λειτουργήσει υπό την εποπτεία και ευθύνη του ΛΑΓΗΕ μια προθεσμιακή αγορά ηλεκτρικής ενέργειας (Forward market) με υποχρεωτική φυσική παράδοση των συναλλασσόμενων ποσοτήτων και μια αντίστοιχη αγορά εξωχρηματιστηριακών διμερών συμβάσεων (bilateral OTC market), με προαιρετική συμμετοχή. Προκειμένου να εξασφαλισθεί ρευστότητα τόσο στην προθεσμιακή αγορά όσο και στην αγορά επόμενης ημέρας, στα αρχικά στάδια εφαρμογής του μοντέλου στόχου, θα υπάρχει συγκεκριμένη ποσόστωση για προμηθευτές με αυξημένο μερίδιο της αγοράς. Έτσι κάθε τέτοιος προμηθευτής δε θα μπορεί να κατέχει προθεσμιακά προϊόντα, Forward και OTC, πάνω από το 25%, για παράδειγμα, του συνολικού του χαρτοφυλακίου. Οι δύο αυτές αγορές θα λειτουργούν με προσφορές ανά χαρτοφυλάκιο παραγωγής και προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας (portfolio-based) και όχι ανά μονάδα παραγωγής (unit-based) ξεχωριστά για αγορά ενέργειας και ξεχωριστά για πώληση. Για τη διασύνδεση της Χονδρικής Αγοράς Προθεσμιακών Προϊόντων Ηλεκτρικής Ενέργειας με την Αγορά Επόμενης Ημέρας θα πρέπει



να γίνεται κατανομή των συναλλασσόμενων ποσοτήτων, που αντιστοιχούν στις καθαρές θέσεις των συμμετεχόντων από συναλλαγές Προθεσμιακών Προϊόντων Ηλεκτρικής Ενέργειας. Η κατανομή αυτών των ποσοτήτων που αντιστοιχούν στις καθαρές θέσεις των συμμετεχόντων στις παραπάνω αγορές, θα γίνεται μέσω δηλώσεων χρήσης ως εξής:

- Ανά μονάδα παραγωγής ή ανά σύνορο σε περίπτωση εισαγωγών, για τις ποσότητες που έχουν πουληθεί.
- Ανά ζώνη για το φορτίο ή ανά σύνορο σε περίπτωση εξαγωγών για τις ποσότητες που έχουν αγορασθεί.

Οι δηλώσεις αυτές υποβάλλονται το αργότερο το πρωί της ημέρας D-1 για κάθε ημέρα κατανομής D (σχήμα 8.2), και ακολουθούνται από αντίστοιχη υποβολή μη τιμολογούμενων προσφορών, για τις παραπάνω δηλωθείσες ποσότητες, στη διαδικασία εκκαθάρισης της ημερήσιας αγοράς από το ΛΑΓΗΕ για λογαριασμό των συμμετεχόντων. Η συμμετοχή των ΑΠΕ δεν προβλέπεται στην προθεσμιακή αγορά σε πρώτη φάση σύμφωνα με την μελέτη του διεθνούς συμβούλου, οπότε και δεν κρίνεται σκόπιμο να αναλυθεί περαιτέρω.

### 8.2.2 Αγορά επόμενης ημέρας (Day ahead market)

Ως φυσική συνέχεια της προθεσμιακής αγοράς, από πλευράς χρονικής αλληλουχίας, εμφανίζεται η αγορά της επόμενης ημέρας. Η αγορά της επόμενης ημέρας στην ουσία θα αντικαταστάσει τον σημερινό ΗΕΠ (ημερήσιος ενεργειακός προγραμματισμός). Δικαίωμα συμμετοχής στην Αγορά Επόμενης Ημέρας θα έχουν οι κάτοχοι άδειας παραγωγής, οι κάτοχοι άδειας προμήθειας, οι κάτοχοι άδειας εμπορίας, οι Φορείς Σωρευτικής Εκπροσώπησης (ΦοΣΕ), οι αυτοπρομηθευόμενοι πελάτες, καθώς και οι καταναλωτές. Οι βασικές δομές της αγοράς επόμενης ημέρας αφορούν την διασύνδεσή της με την προθεσμιακή αγορά και την αγορά των εξωχρηματιστηριακών διμερών συμβάσεων, τις διαδικασίες πριν, κατά και μετά τη σύζευξη της ευρωπαϊκής ημερήσιας αγοράς, και την διασύνδεσή της με την ενδοημερήσια αγορά και τις αγορές εξισορρόπησης.

Συνοπτικά, οι ποσότητες που θα συναλλάσσονται (portfolio-based) από τους συμμετέχοντες τόσο στην προθεσμιακή αγορά (Forward market) όσο και στην αγορά διμερών συμβάσεων (OTC market) θα υποβάλλονται σε μία πλατφόρμα καταχωρήσεων (Registration Platform) ως εξής:

- Αυτόματα, από τη λειτουργία της προθεσμιακής αγοράς του ΛΑΓΗΕ, στην περίπτωση των προθεσμιακών συμβολαίων.
- Από τους ίδιους τους συμμετέχοντες, με συγκεκριμένους κανόνες, στην περίπτωση των εξωχρηματιστηριακών διμερών συμβάσεων (OTCs).

Στην πλατφόρμα αυτή, το απόγευμα κάθε ημέρας D-2, θα υπολογίζονται οι καθαρές θέσεις (Net Delivery Positions, NDPs) των συμμετεχόντων συνολικά στις Forward και OTC αγορές, για τα ενεργειακά προγράμματα της ημέρας κατανομής D και για κάθε μία από τις ωριαίες

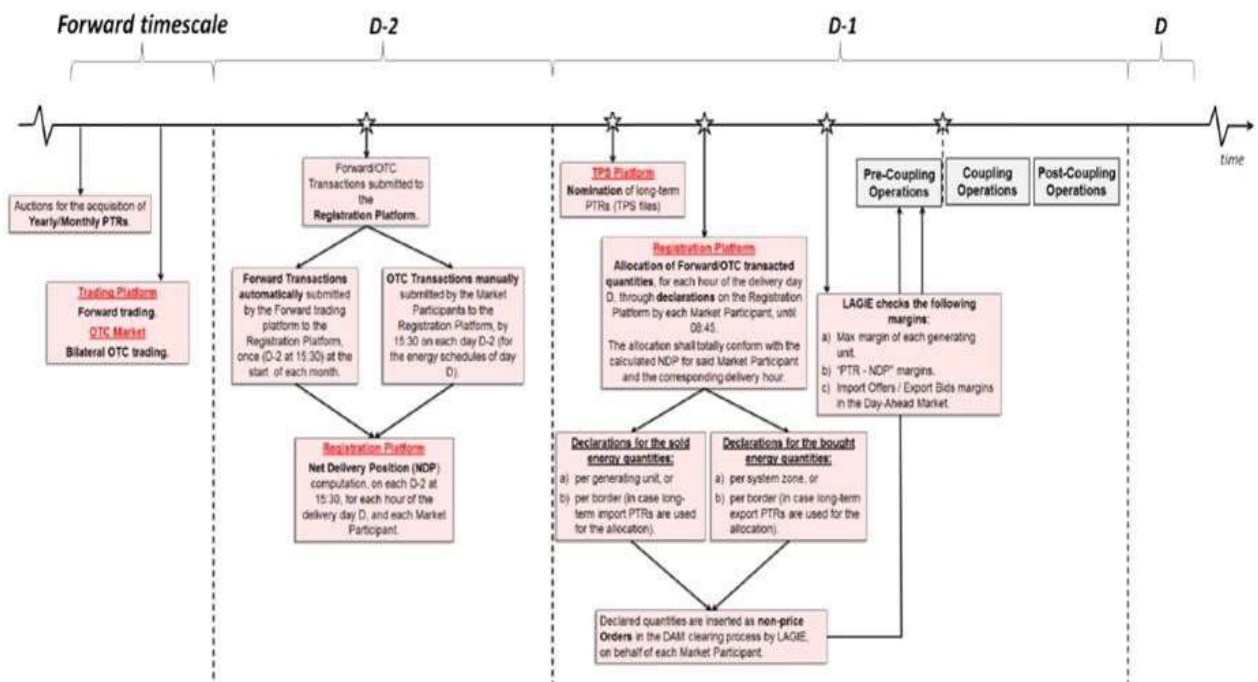
περιόδους που αυτές κατανέμονται. Το αργότερο μέχρι το πρωί της ημέρας D-1, οι συμμετέχοντες οφείλουν να υποβάλουν στην πλατφόρμα καταχωρήσεων (Registration Platform) δηλώσεις χρήσης για την κατανομή (allocation) των καθαρών θέσεων τους (NDPs), όπου θα δηλώνονται:

- Οι πωληθείσες ποσότητες ανά μονάδα παραγωγής ή σύνολο (σε περίπτωση χρήσης μακροχρόνιων Φυσικών Δικαιωμάτων Μεταφοράς για εισαγωγές)
- Οι αγορασθείσες ποσότητες ανά ζώνη ή σύνολο (σε περίπτωση χρήσης μακροχρόνιων Φυσικών Δικαιωμάτων Μεταφοράς για εξαγωγές).

Στη συνέχεια, ο Λειτουργός της αγοράς θα υποβάλλει αυτόματα μη τιμολογούμενες ωριαίες προσφορές (non-priced orders) στη διαδικασία εκκαθάρισης της συζευγμένης ημερήσιας αγοράς (Day-ahead market coupling), εκ μέρους των συμμετεχόντων, βάσει ακριβώς των ποσοτήτων που δηλώθηκαν από τους ίδιους. Η υποβολή αυτή πραγματοποιείται για λόγους φυσικής εκπλήρωσης των καθαρών θέσεων των συμμετεχόντων και έπειτα η εκκαθάριση των αντίστοιχων ποσοτήτων (φυσική και οικονομική) θα υπόκειται στις διαδικασίες της ημερήσιας αγοράς.

Ο Λειτουργός της Αγοράς, πριν την υποβολή των προσφορών παραγωγής στην επίλυση της συζευγμένης ημερήσιας αγοράς, θα επιβεβαιώνει ότι το σύνολο των προσφορών που υποβλήθηκαν στην ημερήσια αγορά και των προγραμμάτων που προκύπτουν από τις Forward και OTC αγορές δεν υπερβαίνει τη μέγιστη δυνατότητα παραγωγής (max margin) κάθε μονάδας παραγωγής, σε διαφορετική περίπτωση θα εφαρμόζονται κανόνες περικοπής. Επίσης, έχουν προβλεφθεί έλεγχοι (PTR/NDP margins) σχετικά με τη μέγιστη δυνατή χρήση μακροχρόνιων Φυσικών Δικαιωμάτων Μεταφοράς για την κάλυψη των Forward και OTC ποσοτήτων (καθαρών θέσεων) κατά τη δήλωση χρήσης τους από τους συμμετέχοντες, καθώς και έλεγχοι (import offers/export bids margins) για τις μέγιστες δυνατές προσφορές εισαγωγών και δηλώσεις εξαγωγών στην ημερήσια αγορά.

Στο παρακάτω σχήμα αποτυπώνονται οι αλληλεπιδράσεις των προθεσμιακών αγορών (Forward και OTC) με την ημερήσια αγορά ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 8.2: Βασικές αλληλεπιδράσεις των Forward/OTC αγορών με την ημερήσια αγορά

Η τυποποίηση των προσφορών που υποβάλλονται από τους συμμετέχοντες στις ημερήσιες αγορές σε διάφορες ευρωπαϊκές χώρες παρέχει αρκετές δυνατότητες επιλογών. Στην Ελληνική ημερήσια αγορά προτείνεται η χρήση απλών ωριαίων δηλώσεων (simple hourly orders), μπλοκ δηλώσεων (block orders) και σύνθετων δηλώσεων (complex orders) τόσο για τις προσφορές παραγωγής, όσο και για τις δηλώσεις φορτίου.

Η συμμετοχή και η ένταξη των ΑΠΕ στην ημερήσια αγορά ενέργειας θα γίνει σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, η ευθύνη της διαχείρισης των ΑΠΕ, θα παραμείνει στον διαχειριστή του συστήματος και θα περιλαμβάνει την πρόβλεψη παραγωγής, την εισαγωγή μη τιμολογούμενων προσφορών στην ημερήσια αγορά για τις προβλεπόμενες ποσότητες παραγωγής και την ευθύνη χειρισμού των αποκλίσεων των ΑΠΕ στο σύστημα. Το στάδιο αυτό θα είναι μεταβατικό, έτσι ώστε να δοθεί χρόνος στους παραγωγούς ΑΠΕ να προσαρμοστούν στο νέο μοντέλο αγοράς και να μπορούν να χειρίζονται μόνοι τους την συμμετοχή τους στις αγορές. Στο δεύτερο στάδιο, οι ευθύνες της πρόβλεψης παραγωγής, της δήλωσης προσφορών στην ημερήσια αγορά και ευθύνη χειρισμού των αποκλίσεων παραγωγής θα μεταφερθούν στους ίδιους τους παραγωγούς για ΑΠΕ εγκατεστημένης ισχύος άνω των 10MW. Ο στόχος είναι μέσα από τις διαδικασίες ωρίμανσης των νέων αγορών αυτών και της αποκτούμενης εμπειρίας από τους συμμετέχοντες, οι ευθύνες συμμετοχής στις αγορές να επεκταθούν και σε παραγωγούς ΑΠΕ με μικρότερη εγκατεστημένη ισχύ.

### 8.2.3 Ενδοημερήσια αγορά ενέργειας (Intra-day market)

Στην ενδοημερήσια αγορά, οι συμμετέχοντες θα έχουν προαιρετικά τη δυνατότητα να προβαίνουν σε συναλλαγές προκειμένου να ελαχιστοποιήσουν την απόκλιση της καθαρής θέσης τους που προκύπτει από τις συναλλαγές σε όλες τις αγορές, από τις πωλούμενες ή αγορασθείσες ποσότητες σε πραγματικό χρόνο. Η ενδοημερήσια αγορά ενέργειας θα υλοποιηθεί σε τρεις διαδοχικές φάσεις έχοντας ως σκοπό την ομαλότερη σταδιακή προσαρμογή στις επιταγές του ευρωπαϊκού μοντέλου στόχου, αλλά και την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των υπαρχόντων διασυνοριακών διασυνδέσεων στην Ελλάδα. Στην πρώτη φάση θα εφαρμοστεί το μοντέλο των ενδοημερήσιων δημοπρασιών (intra-day sessions), όπου οι συναλλαγές γίνονται σε προκαθορισμένες χρονικές στιγμές, έτσι ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή συνεργασία με την ιταλική ενδοημερήσια και διασυνοριακή αγορά που είναι ήδη οργανωμένη και λειτουργεί με την αρχιτεκτονική αυτή. Δεδομένου ότι η αρχιτεκτονική αυτή είναι απλή, θα είναι εύκολο να εφαρμοστεί και στις υπόλοιπες διασυνοριακές διασυνδέσεις (Βουλγαρία, Τουρκία, Αλβανία και ΠΓΔΜ) σε περίπτωση που οι λειτουργοί των αγορών αυτών υιοθετήσουν τους ευρωπαϊκούς κανονισμούς και τις οδηγίες. Στην δεύτερη φάση θα εφαρμοστούν συνεχείς ενδοημερήσιες συναλλαγές για την ελληνική ενδοημερήσια αγορά και την ελληνοϊταλική διασυνοριακή αγορά, ενώ οι ενδοημερήσιες δημοπρασίες θα διατηρηθούν για υπόλοιπες διασυνοριακές αγορές. Στην τρίτη και τελευταία φάση, όλες οι συναλλαγές τόσο στην εσωτερική ενδοημερήσια αγορά, όσο και στις διασυνοριακές αγορές θα ακολουθούν το μοντέλο των συνεχών ενδοημερήσιων συναλλαγών.

Αναλυτικότερα, η εμπορική δραστηριότητα των συμμετεχόντων στην ενδοημερήσια αγορά κατά την πρώτη φάση θα πραγματοποιείται ανά χαρτοφυλάκιο σε μια σειρά από πέντε διαδοχικές δημοπρασίες (IDM1-IDM5) σε προκαθορισμένες ώρες. Μετά τη δημοσίευση των αποτελεσμάτων κάθε ενδοημερήσιας δημοπρασίας θα ακολουθεί μια διαδικασία υποβολής ενδοημερήσιων δηλώσεων χρήσης σε μια πλατφόρμα καταχωρήσεων από την πλευρά των συμμετεχόντων, έτσι ώστε να καταναείμουν τις ποσότητες που εκκαθαρίστηκαν ανά μονάδες παραγωγής, ανά ζώνη συστήματος όταν πρόκειται για φορτίο, και ανά διασυνοριακή σύνδεση όταν πρόκειται για εισαγωγές ή εξαγωγές ενέργειας. Ακολούθως, ο ΛΑΓΗΕ και ο ΑΔΜΗΕ θα διενεργούν ελέγχους που αφορούν την ορθότητα των ποσοτήτων που δηλώθηκαν ανά χαρτοφυλάκιο συμμετέχοντα και τη συμμόρφωση της νέας θέσης κάθε μονάδας παραγωγής με τις ποσότητες εφεδρειών που η κάθε μονάδα έχει από πριν αναλάβει να παρέχει κατά την διαδικασία της κεντρικής κατανομής και τους τεχνικούς περιορισμούς της κάθε μονάδας. Οι εντολές συναλλαγών για έγχυση ΑΠΕ και για τους Φορείς Σωρευτικής Εκπροσώπησης θα έχουν τη δυνατότητα να υποβάλλονται ανά χαρτοφυλάκιο και ζώνη φορτίου. Οι Φορείς Σωρευτικής Εκπροσώπησης θα υποβάλουν εντολές διακριτά για πώληση και αγορά.

Κατά την δεύτερη και την τρίτη φάση, όπου θα εφαρμοστούν συνεχείς ενδοημερήσιες συναλλαγές, κάθε προσφορά θα είναι διαπραγματεύσιμη μέχρι και μία ώρα πριν την φυσική της εκπλήρωση. Οι ενδοημερήσιες δηλώσεις χρήσης των συναλλασσομένων ποσοτήτων θα υποβάλλονται όπως πριν σε μια πλατφόρμα καταχωρήσεων το αργότερο έως 45 λεπτά πριν

την φυσική της εκπλήρωση. Στην συνέχεια, όπως και προηγουμένως, θα διενεργούνται οι έλεγχοι των δηλώσεων αυτών από ΛΑΓΓΗΕ και ΑΔΜΗΕ.

#### **8.2.4 Αγορά εξισορρόπησης (Balancing market)**

Η αγορά εξισορρόπησης θα αποτελείται από δύο επιμέρους αγορές, την αγορά ισχύος εξισορρόπησης (Balancing Capacity Market) και την αγορά ενέργειας εξισορρόπησης ((Balancing Energy Market). Δικαίωμα συμμετοχής σε αυτές τις αγορές θα έχουν οι κάτοχοι άδειας παραγωγής, οι κάτοχοι άδειας προμήθειας, οι κάτοχοι άδειας εμπορίας, οι Φορείς Σωρευτικής Εκπροσώπησης (ΦοΣΕ), οι αυτοπρομηθευόμενοι πελάτες, καθώς και οι καταναλωτές στο πλαίσιο της διαχείρισης της ζήτησης (Demand Response, DR). Για την παροχή υπηρεσιών εξισορρόπησης από τους παραπάνω φορείς θα απαιτείται υπογραφή σχετικής σύμβασης παροχής υπηρεσιών εξισορρόπησης και εγγραφή στο μητρώο παρόχων υπηρεσιών εξισορρόπησης (Balancing Service Providers ή BSPs). Η συμμετοχή των επιλέξιμων μονάδων παραγωγής σε αυτή την αγορά θα είναι υποχρεωτική για το σύνολο της διαθεσιμότητάς τους.

Ο κεντρικός προγραμματισμός (Central Dispatch) και η κατανομή των μονάδων παραγωγής από τον Διαχειριστή του Συστήματος θα διατηρηθεί ως βασική αρχή για την εξισορρόπηση του συστήματος και στον νέο σχεδιασμό. Στο πλαίσιο αυτό, ο κεντρικός προγραμματισμός θα αποτελεί μία ξεχωριστή διαδικασία που θα συμβάλλει στην ενέργεια εξισορρόπησης και στην ισχύ εξισορρόπησης. Ο προγραμματισμός αυτός θα λαμβάνει χώρα διαδοχικά ξεκινώντας από την ημέρα D-1 κατόπιν της επίλυσης της Αγοράς Επόμενης Ημέρας, και συνεχίζοντας με μία σειρά από διαδοχικές επαναλήψεις κατά τη διάρκεια της ημέρας κατανομής D-1 και D, με σκοπό να κατανείμει τις απαραίτητες εφεδρείες στις επιλέξιμες μονάδες παραγωγής, να λάβει μέτρα για την διευθέτηση προβλεπόμενων ανισορροπιών του συστήματος με προληπτική ενεργοποίηση εφεδρείας και να αναρτά ενδεικτικά προγράμματα παραγωγής, τα οποία θα αναπροσαρμόζονται με την συμμετοχή των παραγωγών στην ενδοημερήσια αγορά. Σε αυτό το πλαίσιο, θα υλοποιούνται από τον Διαχειριστή του Συστήματος, κατ' ελάχιστον τέσσερις διαδοχικές επιλύσεις κεντρικού προγραμματισμού κατανομής.

Οι προσφορές των συμμετεχόντων για ισχύ εξισορρόπησης και ανοδική ή καθοδική ενέργεια εξισορρόπησης θα υποβάλλονται σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους που θα ορίζονται για κάθε επίλυση σε συγκεκριμένη προθεσμία, λαμβάνοντας υπόψη τις προβλέψεις του Ευρωπαϊκού Κώδικα Εξισορρόπησης. Οι προσφορές ενέργειας εξισορρόπησης θα επιτρέπεται να τροποποιηθούν μόνο στην αγορά εξισορρόπησης ενέργειας πραγματικού χρόνου, και μόνο στην περίπτωση υποβολής προσφορών που θα περιέχουν βελτιωμένες τιμές. Με τον όρο βελτιωμένες τιμές εννοούνται οι μικρότερες τιμές για προσφορές ανοδικής ενέργειας εξισορρόπησης και οι μεγαλύτερες τιμές για προσφορές καθοδικής ενέργειας εξισορρόπησης. Από την επίλυση του κεντρικού προγραμματισμού κατανομής θα προκύπτουν οι τιμές των προϊόντων ισχύος εξισορρόπησης (εφεδρειών) και η τιμολόγηση

τους θα έχει την δυνατότητα να βασίζεται είτε στην αρχή της οριακής τιμολόγησης (marginal price), είτε στην τιμολόγηση βάσει προσφοράς (pay as bid).

Η αγορά εξισορρόπησης ενέργειας πραγματικού χρόνου θα υιοθετεί τα αποτελέσματα της διαδικασίας του κεντρικού προγραμματισμού κατανομής και οι συμμετέχοντες σε αυτή θα υποβάλλουν προσφορές ανοδικής ή καθοδικής ρύθμισης για κάθε μισάωρο διάστημα της ημέρας κατανομής έως και μισή ώρα πριν την έναρξή του, οι οποίες θα διαιρούνται σε έξι αντίστοιχα 5- λεπτα προϊόντα ανοδικής ή καθοδικής ενέργειας εξισορρόπησης και θα λαμβάνονται υπόψη από το Διαχειριστή του Συστήματος στις συνεχείς και διαδοχικές (5- λεπτον βήματος) επιλύσεις του προβλήματος οικονομικής κατανομής πραγματικού χρόνου (5- min real- time dispatch ή RTD). Η αγορά αυτή θα παράγει τις τιμές ενέργειας εξισορρόπησης, που θα χρησιμοποιούνται στην συνέχεια για την εκκαθάριση τόσο της ενέργειας εξισορρόπησης που θα προμηθεύονται σε πραγματικό χρόνο από τις κατάλληλες πηγές εξισορρόπησης, όσο και για την εκκαθάριση των αποκλίσεων παραγωγής- ζήτησης (Imbalance settlement) που ενδεχομένως θα μετρούνται σε πραγματικό χρόνο.

### 8.3 Επενδύσεις

Καταλαβαίνει κανείς λοιπόν, ότι ο ρόλος των εργαλείων πρόβλεψης παραγωγής ενέργειας είναι ιδιαίτερα σημαντικός και δίνεται μεγάλη βαρύτητα και σημασία. Αυτό γιατί, όσο πιο ορθή είναι μια πρόβλεψη παραγωγής για την συμμετοχή της εταιρείας σε κάποια από τις προαναφερθείσες αγορές, τόσο μεγιστοποιείται το κέρδος, δεν υπάρχει κίνδυνος εφαρμογής προστίμου και δεν χρειάζεται περεταίρω διόρθωση στην ενδοημερήσια αγορά. Όλες οι εταιρείες λοιπόν για την καλύτερη και βέλτιστη συμμετοχή τους στο Χρηματιστήριο Ενέργειας προσπαθούν να αναπτύξουν ή να βρουν τρίτους ώστε να έχουν το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα. Σωστή πρόβλεψη παραγωγής και αύξηση των κερδών τους.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 : ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΡΟΒΛΕΨΕΩΝ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ

### 9.1 Εισαγωγή

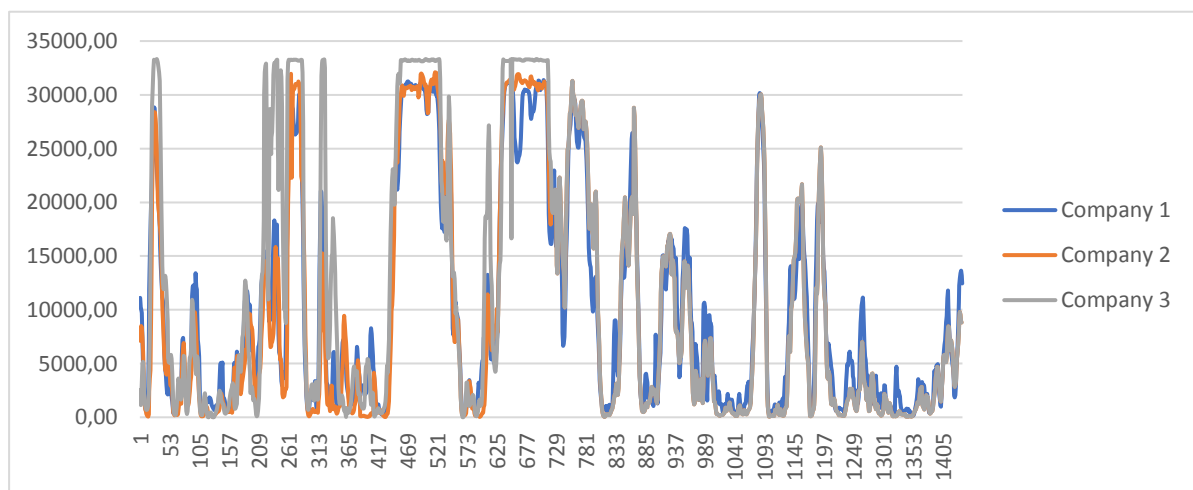
Είναι ξεκάθαρο λοιπόν πως μια σωστή πρόβλεψη μετεωρολογικών δεδομένων και κατ'επέκταση πρόβλεψη παραγωγής ενός αιολικού πάρκου είναι ιδιαίτερα σημαντική διότι με αυτό το τρόπο μια εταιρεία μπορεί να κάνει χρήση αυτών των αποτελεσμάτων με πολλούς τρόπους προς το συμφέρον της. Εκτός από τον προγραμματισμό των συντηρήσεων της μπορεί να χρησιμοποιήσει αυτά τα δεδομένα και μέσω των συναλλαγών της στο χρηματιστήριο ενέργειας που υποχρεούται να συμμετέχει μπορεί να βγάλει μεγαλύτερο κέρδος από αυτό που υπολόγιζε δίνοντας σωστές προβλέψεις παραγωγής βραχυπρόθεσμα ή και μαμεσοπρόθεσμα.

Παρακάτω θα δούμε συνοπτικά την σύγκριση 3 εταιριών σε ένα αιολικό πάρκο στην Βοιωτία ισχύος 33MW που αποτελείται από 13 ανεμογεννήτριες της δανέζικης εταιρείας VESTAS τύπου V90 – 2MW και V117 – 3.45MW.

Αρχικά να αναφέρουμε πως τα δεδομένα των εταιριών μας παρέχονται σε μορφή .csv την ίδια ακριβώς ώρα σε ωριαίες τιμές ώστε να μπορούμε να κάνουμε όσο το δυνατόν πιο έγκυρη σύγκριση (benchmark) και εξαγωγή αποτελεσμάτων.

### 9.2 Δεδομένα

Παρακάτω στο σχήμα X παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τριών εταιριών σε μορφή χρονοσειράς. Η περίοδος εξέτασης είναι το διάστημα από 1<sup>η</sup> Μαρτίου ως 30 Απριλίου.

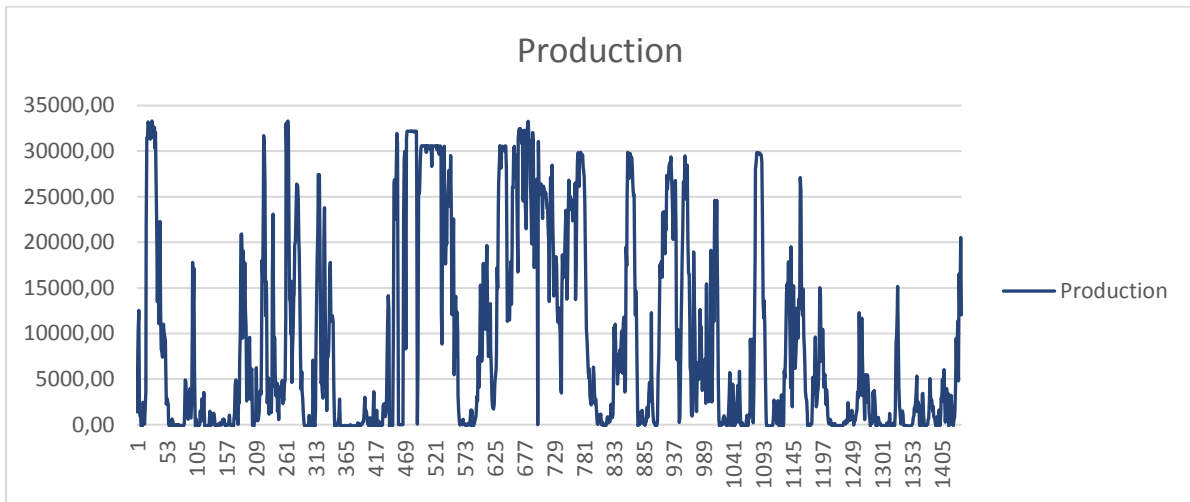


Σχήμα 9.1: Χρονοσειρές προβλέψεων από τρεις διαφορετικές εταιρείες

Παρατηρούμε λοιπόν, ότι οι 3 εταιρείες παρουσιάζουν κοινή μορφή χρονοσειράς και διαφέρουν μόνο στο μέγεθος της πρόβλεψης. Αυτό συμβαίνει για τους εξής λόγους.

- Διαφορετικό μοντέλο πρόβλεψης καιρού
- Διαφορετική επεξεργασία δεδομένων
- Calibration αποτελεσμάτων με βάση τα ιστορικά στοιχεία.

Η πραγματική παραγωγή φαίνεται στην παρακάτω χρονοσειρά (σχήμα X)



Σχήμα 9.2: Χρονοσειρά πραγματικής παραγωγής

Αν λοιπόν κάνουμε τη σύγκριση των τριών εταιρειών παροχής υπηρεσιών πρόβλεψης παραγωγής για ΑΠΕ με την πραγματική παραγωγή του πάρκου, θα δούμε ότι βρίσκονται σχετικά κοντά. Με βάση τους στατιστικούς δείκτες αξιολόγησης που αναφερθήκαμε σε προηγούμενο επίπεδο θα δούμε και με αριθμούς τον βαθμό επιτυχίας τους.

Company	Time Period	NMAE (inst. Cap.)	NMAE (prod.)	NRMSE (inst. Cap.)	NRMSE (production)
Company 1	1/3-30/4	11.13	39.90	15.73	56.39
Company 2		12.25	44.15	19.39	69.90
Company 3		13.61	48.69	21.92	78.44

Πίνακας 9.1. Σύγκριση των 3 εταιρειών με βάση τους στατιστικούς δείκτες

Κάνοντας χρήση των δεικτών Normalized MAE και RMSE δηλαδή κανονικοποιημένο μέσο απόλυτο σφάλμα και μέσο τετραγωνικό σφάλμα ως προς την εγκατεστημένη ισχύς ή την

παραγωγή μπορούμε να εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα. Να σημειωθεί πως όσο μικρότερο είναι το νούμερο τόσο πιο κοντά στα πραγματικά δεδομένα έχει πέσει η πρόβλεψη.

Η εταιρεία 1 έχει και στους 4 δείκτες αξιολόγησης καλύτερα αποτελέσματα σε αντίθεση με την εταιρεία 3.

Το ποσοστό σφάλματος ως προς την παραγωγή είναι σχετικά μη αποδεκτό μιας και ξεπερνά το όριο του 30%. Ειδικά το μέσο τετραγωνικό σφάλμα το οποίο δεν συγχωρεί μεγάλα σφάλματα δείχνει ακριβώς αυτό. Ότι υπάρχουν αρκετές ωριαίες τιμές που η πρόβλεψη τελικά δεν είναι σωστή και χρίζει περαιτέρω διερεύνηση για την διόρθωση αυτού του σφάλματος.

Αυτού του είδους οι αστοχίες μπορούν να επιλυθούν εφαρμόζοντας διάφορες λύσεις όπως:

- Ιστορικότητα πάρκου
- Βελτιστοποίηση μοντέλων πρόβλεψης καιρού
- Εφαρμογή machine learning
- Άμεση επικοινωνία με τον κύριο του πάρκου/scada για τυχόν σφάλματα και διόρθωση της διαθεσιμότητας του πάρκου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---

Η διαρκής αύξηση των ΑΠΕ και συγκεκριμένα της Αιολικής Ενέργειας γεννά επιπλέον ανάγκες στους επενδυτές. Μια πολύ σημαντική ανάγκη είναι η πρόβλεψη της παραγωγής μέσα από τα μετεωρολογικά δεδομένα και τη σωστή επεξεργασία δεδομένων (ιστορικά στοιχεία, τοπογραφία, διαθεσιμότητα κ.α.). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση πολλών εταιρειών που προσφέρουν τέτοιου είδους υπηρεσίες, οι οποίες προσπαθούν να αναπτύξουν με το καλύτερο δυνατό τρόπο το δικό τους μοντέλο ώστε να παρέχουν βέλτιστες προβλέψεις παραγωγής.

Στη παρούσα διπλωματική λοιπόν, παρουσιάστηκε η αξία της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος που δεν είναι άλλη από την αντιστάθμιση της μεταβλητότητας του ανέμου με την βοήθεια μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος για τις επόμενες ώρες είτε για την διαχείριση είτε για την αγορά της ενέργειας. Για να αναπτυχθούν, όμως, αυτές οι μέθοδοι πρόβλεψης έπρεπε να εξεταστούν όλοι οι παράγοντες στους οποίους βασίζεται το πρόβλημα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος και να διαμορφωθεί το θεωρητικό υπόβαθρο με βάση τα χαρακτηριστικά του προβλήματος.

Όπως έχει αναφερθεί, ένα μοντέλο πρόβλεψης της αιολικής ισχύος αναλαμβάνει να προσομοιώσει τις σχέσεις των αριθμητικών προβλέψεων καιρού με την έξοδο ενός αιολικού πάρκου. Έτσι λοιπόν, παρουσιάστηκαν οι βασικές λειτουργίες ενός μετεωρολογικού μοντέλου που παράγει τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού, εξετάστηκαν τα χαρακτηριστικά της συνάρτησης που διέπει την ταχύτητα του ανέμου με την έξοδο μιας ανεμογεννήτριας αλλά και όλους τους παράγοντες που την επηρεάζουν και περιγράφηκαν τα πιο γνωστά μοντέλα αριθμητικών προβλέψεων καιρού που συμμετέχουν στην αγορά, αλλά και τα μοντέλα με την υψηλότερη ανάλυση που παρέχουν πιο λεπτομερείς μετεωρολογικές προβλέψεις.

Εν κατακλείδι, η παρούσα διπλωματική παρέχει τις βασικές γνώσεις που χρειάζεται να έχει κάποιος που θέλει να ασχοληθεί με αυτό το κομμάτι της επιστήμης και να αναπτύξει ένα μοντέλο πρόβλεψης αιολικής ισχύος με μικρό ποσοστό σφάλματος. Από το τι περιέχουν οι βασικές αριθμητικές προβλέψεις καιρού και πως εφαρμόζονται στην πρόβλεψη της ισχύος μέχρι και τις ήδη υπάρχουσες εφαρμογές καθώς και σημερινές απαιτήσεις της αγοράς (συντήρηση – διαχείριση – χρηματιστήριο ενέργειας).

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- [1] Μ. Π. Παπαδόπουλος, «ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ», εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1997
- [2] Σταύρος Παπαθανασίου. «Εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης αιολικών πάρκων». ΕΜΠ. Νοέμβριος 2005.
- [3] Γιώργος Σιδεράτος. «Ενδιάμεση Κρίση, Πρόβλεψη παραγωγής αιολικού πάρκου». ΕΜΠ. Αθήνα 9/10/2006.
- [4] Pierre Pinson. “Estimation of the uncertainty in wind power forecasting”. 23/3/2006. Paris.
- [5] G. Cats, L. Wolters. “The HIRLAM project”. IEEE Computational Science & Engineering, vol 3, no. 4, pp.4-7, 1996.
- [6] S.R. Hanna and R. Yang, “Evaluations of Mesoscale Models' Simulations of Near-Surface Winds, Temperature Gradients, and Mixing Depths,” Journal of Applied Meteorology, vol. 40, pp. 1095–1104, 2001.
- [7] J. Usaola, O. Ravelo, G. Gonzalez, F. Soto, C. Davila, and B. Diaz-Guerra. “Benefits for wind energy in electricity markets from using short term wind power prediction tools - A simulation study”. Wind Engineering, 28(1), pp.119–128, 2004.
- [8] J. McLean Sloughter, Tilmann Gneiting, and Adrian E. Raftery. “Probabilistic Wind Speed Forecasting using Ensembles and Bayesian Model Averaging” Technical Report no. 544. October 14, 2008.
- [9] B. Storm, J. Dudhia, S. Basu, A. Swift, and I. Giammanco, “Evaluation of the Weather Research and Forecasting model on forecasting low-level jets: implications for wind energy,” Wind Energy, vol. 12, pp. 81–90, 2008.
- [10] J.L. Case, J. Manobianco, J.E. Lane, C.D. Immer, and F.J. Merceret, “An Objective Technique for Verifying Sea Breezes in High-Resolution Numerical Weather Prediction Models,” Weather Forecasting, vol. 19, pp. 690–705, 2004.
- [11] D.L. Rife, C.A. Davis, Y. Liu, and T.T. Warner, “Predictability of Low-Level Winds by Mesoscale Meteorological Models,” Monthly Weather. Review, vol. 132, pp. 2553–2569, 2004.
- [12] C.F. Mass, D. Ovens, K. Westrick, and B.A. Colle, “Does Increasing Horizontal Resolution Produce More Skillful Forecasts?,” Bull. Amer. Meteor. Soc., vol. 83, pp. 407–430, 2002.
- [13] E.P. Grimit and C.F. Mass, “Initial Results of a Mesoscale Short-Range Ensemble Forecasting System over the Pacific Northwest,” Weather Forecasting, vol. 17, pp. 192–205, 2002.
- [14] J.S. Hong, “Evaluation of the High-Resolution Model Forecasts over the Taiwan Area during GIMEX,” Weather Forecasting, vol. 18, pp. 836–846, 2003.
- [15] V. Kotroni and K. Lagouvardos, “Evaluation of MM5 High-Resolution Real-Time Forecasts over the Urban Area of Athens, Greece,” Journal of Applied Meteorology, vol. 3, pp. 1666–1678, 2004.

- [16] Gregor Giebel, G. Kariniotakis, and R. Brownsword, "State of the Art on Short-term Wind Power Prediction," ANEMOS Deliverable Report D1.1, 2003.
- [17] U. Focken, M. Lange, and H.-P. Waldl, "Reduction of Wind Power Production Error by Spatial Smoothing Effects," in Proceedings of the European Wind Energy Conference EWEC'01, pp. 822–825, Copenhagen, Denmark, June 2–6, 2001.
- [18] P. Pinson, N. Siebert, and G. Kariniotakis, "Forecasting of Regional Wind Generation by a Dynamic Fuzzy-Neural Networks Based Upscaling Approach," in Proceedings of the European Wind Energy Conference EWEC'03, Madrid, Spain, June 16–19, 2003.
- [19] N. Siebert, "Development of methods for regional Wind Power Forecasting," Ph.D. dissertation, CEP – Centre Energétique et Procédés, ENSMP, 2008.
- [20] E.A. Bossanyi, "Short-Term Wind Prediction Using Kalman Filters," Wind Engineering, vol. 9, no. 1, pp. 1–8, 1985.
- [21] G.C. Contaxis and J. Kabouris, "Short term scheduling in a wind/diesel autonomous energy system," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 6, no. 3, pp. 1161–1167, 1991.
- [22] L. Kamal and Y.Z. Jafri, "Time series models to simulate and forecast hourly average wind speed in Quetta," Solar Energy, vol. 61, no. 1, pp. 23–32, 1997.
- [23] U. Schlink and G. Tetzlaff, "Wind speed forecasting from 1 to 30 minutes," Theoretical and Applied Climatology, vol. 60, pp. 191–198, 1998.
- [24] P. Poggi, M. Muselli, G. Notton, C. Cristofì, and A. Louche, "Forecasting and simulating wind speed in Corsica by using an autoregressive model," Energy Conversion and Management, vol. 14, no. 20, pp. 3177–3196, 2003.
- [25] J.L. Torres, A. García, M. de Blas, and A. de Francisco, "Forecast of hourly averages wind speed with ARMA models in Navarre," Solar Energy, vol. 79, no. 1, pp. 65–77, 2005.
- [26] C. Tantareanu, "Wind prediction in short-term: a first step for a better wind turbine control, Nordvestjysk Folkecenter for Vedvarende Energi, October 1992.
- [27] R.G. Kavasseri and K. Seetharaman, "Day-ahead wind speed forecasting using f-ARIMA models," Renewable Energy, vol. 34, no. 5, pp. 1388–1393, May 2009.
- [28] M.C. Alexiadis, P.S. Dokopoulos, H.S. Sahsamanoglou, and I.M. Manousaridis, "Shortterm forecasting of wind speed and related electric power," Solar Energy, vol. 63, no. 1, pp. 61–68, 1998.
- [29] A. Sfetsos, "A comparison of various forecasting techniques applied to mean hourly wind speed time series," Renewable Energy, vol. 21, no. 1, pp. 23–35, 2000.
- [30] I.G. Damousis and P. Dokopoulos, "A fuzzy model expert system for the forecasting of wind speed and power generation in wind farms," in Proceedings of the IEEE International Conference on Power Industry Computer Applications PICA 01, pp. 63–69, 2001.
- [31] I. Maqsood, M. Khan, G. Huang, and R. Abdalla, "Application of soft computing models to hourly weather analysis in southern Saskatchewan, Canada," Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 18, no. 1, pp. 115–125, 2005.
- [32] R.E. Abdel-Aal, M.A. Elhadidy, and S.M. Shaahid, "Modeling and forecasting the mean hourly wind speed time series using GMDH-based abductive networks," Renewable Energy, vol. 34, no. 7, pp. 1686–1699, July 2009.



- [33] C.W. Potter and M. Negnevistky, “Very short-term wind forecasting for Tasmanian power generation,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 2, pp. 965–972, 2006.
- [34] I.J. Ramírez-Rosado and L.A. Fernández-Jiménez, “An advanced model for short-term forecasting of mean wind speed and wind electric power,” *Control and Intelligent Systems*, vol. 31, no. 1, pp. 21–26, 2004.
- [35] G. Kariniotakis, E. Nogaret, and G. Stavrakakis, “Advanced Short-Term Forecasting of Wind Power Production,” in *Proceedings of the European Wind Energy Conference EWEC’97*, Dublin, Ireland, pp. 751–754, October 1997.
- [36] I.J. Ramírez-Rosado and L.A. Fernández-Jiménez, “A new electric power forecasting model for wind farms,” in *Proceedings International Conference on Modeling, Identification, and Control*, Grindelwald, Switzerland, pp. 398–401, 2004.
- [37] Laura Frías, Martín Gastón, and Ignacio Martí, “A new model for wind energy forecasting focused in the intra-daily markets,” *Poster Session of the European Wind Energy Conference EWEC’07*, Milan, Italy, 2007.
- [38] Y.V. Makarov, D.L. Hawkins, E. Leuze, and J. Vidov, “California ISO Wind Generation Forecasting Service Design and Experience,” in *Proceedings of the 2002 AWEA Windpower Conference*, Portland, Oregon, June 2–5, 2002.
- [39] Mario J. Duran, Daniel Cros, and Jesus Riquelme, “Short-Term Wind Power Forecast Based on ARX Models,” *Journal of Energy Engineering*, vol. 133, no. 3, pp. 172–180, Sept. 2007.
- [40] A. Costa, A. Crespo, and E. Migoya, “First results from a prediction project,” in *Proceedings of the European Wind Energy Conference EWEC’03*, Madrid, Spain, 2003.
- [41] Lionel Fugon, Jérémie Juban, and G. Kariniotakis, “Data mining for Wind Power Forecasting,” in *Proceedings of the European Wind Energy Conference EWEC’08*, Brussels, Belgium, April 2008.
- [42] R. Jursa, “Wind power prediction with different artificial intelligence models,” in *Proceedings of the European Wind Energy Conference EWEC’07*, Milan, Italy, May 2007.
- [43] A. Kusiak, H.-Y. Zheng, and Z. Song, “Wind Farm Power Prediction: A Data-Mining Approach,” *Wind Energy*, vol. 12, no. 3, pp. 275–293, 2009.
- [44] René Jursa and Kurt Rohrig, “Short-term Wind Power Forecasting using evolutionary algorithms for the automated specification of artificial intelligence models,” *International Journal of Forecasting*, vol. 24, pp. 694–709, 2008.
- [45] T.G. Barbounis and J.B. Theocharis, “Long-term wind speed and power forecasting using local recurrent neural network models,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, no. 1, pp. 273–284, 2006.
- [46] R. Bessa, V. Miranda, and J. Gama, “Entropy and Correntropy against Minimum square Error in Off-Line and On-Line 3-day ahead Wind Power Forecasting,” *IEEE Transactions on Power Systems* (paper in revision), 2009.
- [47] P. Pinson, Henrik Aa. Nielsen, and H. Madsen, “Robust Estimation of Time-varying Coefficient Functions - Application to the Modeling of Wind Power Production,”

- Technical Report of the Project Intelligent Wind Power Prediction Systems, DTU, Lyngby, Denmark, March 2007.
- [48] P. Pinson, H.A. Nielsen, H. Madsen, and T. S. Nielsen, “Local linear regression with adaptive orthogonal fitting for the wind power application,” *Statistics and Computing*, vol. 18, no.1, pp. 59–71, 2008.
- [49] V. Miranda, C. Cerqueira, and C. Monteiro, “Training a FIS with EPSO under an Entropy Criterion for Wind Power prediction,” in *Proceedings of International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, PMAPS 2006*, Stockholm, Sweden, June 11–15, 2006.
- [50] R. Bessa, V. Miranda, and J. Gama, “Wind Power Forecasting with Entropy-Based Criteria Algorithms,” in *Proceedings of International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, PMAPS 2008*, Puerto Rico, May 2008.
- [51] J. Jørgensen, C. Moehrlen, B.Ó Gallaghoir, K. Sattler, and E. McKeogh, “HIRPOM: Description of an operational numerical wind power prediction model for large scale integration of on- and offshore wind power in Denmark,” poster session on the Global Windpower Conference and Exhibition, Paris, France, April 2–5, 2002.
- [52] T. Lozano, P. Orellana, E. Navarro, A. Abascal, and E. Piernagorda, “Prediction and planning of wind energy production,” in *Proceedings of the European Wind Energy Conference EWEC’03*, Madrid, Spain, 2003.
- [53] George Sideratos and Nikos D. Hatziaargyriou, “An Advanced Statistical Method for Wind Power Forecasting,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 1, February 2007.
- [54] A. Costa, A. Crespo, J. Navarro, A. Palomares, and H. Madsen, “Modelling the Integration of Mathematical and Physical Models for Short-term Wind Power Forecasting,” in *Proceedings of the European Wind Energy Conference EWEC’06*, Athens, Greece, 2006.
- [55] H.A. Nielsen, P. Pinson, L.E. Christiansen, T.S. Nielsen, H. Madsen, J. Badger, G. Giebel, and H.F. Ravn, “Improvement and Automation of Tools for Short-term Wind Power Forecasting,” in *Proceedings of the European Wind Energy Conference EWEC’07*, Milan, Italy 2007.
- [56] H.A. Nielsen, P. Pinson, T.S. Nielsen, L.E. Christiansen, H. Madsen, G. Giebel, J. Badger, X.G. Larsen, H. Ravn, J. Tøfting, and L. Voulund, “Intelligent wind power prediction systems – final report,” *Informatics and Mathematical Modelling*, Technical University of Denmark, DTU, 2007.
- [57] H.A. Nielsen, T.S. Nielsen, H. Madsen, M.J.S.I. Pindado, and I. Marti, “Optimal Combination of Wind Power Forecasts,” *Wind Energy*, vol. 10, no. 5, pp. 471–482, July 19, 2007.
- [58] Martín Gastón, Laura Frías, and Ignacio Martí, “Exploring the limits of wind farm grouping for prediction error compensation,” in *Proceedings of the European Wind Energy Conference EWEC’06*, Athens, Greece, 2006.
- [59] N. Siebert and G. Kariniotakis, “Reference wind farm selection for regional wind power prediction models,” in *Proceedings of the European Wind Energy Conference EWEC’06*, Athens, Greece, 2006.

- [60] A. Yamaguchi, T. Ishihara, K. Sakai, T. Ogawa, and Y. Fujino, “An upscaling approach for the regional Wind Power Forecasting,” in Proceedings of the European Wind Energy Conference EWEC’07, Milan, 2007.
- [61] Álvaro Barbero, Jorge López, and José R. Dorronsoro, “Kernel methods for wide area Wind Power Forecasting,” in Proceedings of the European Wind Energy Conference EWEC 08, Brussels, Belgium, 2008.
- [62] L. von Bremen, N. Saleck, and D. Heinemann, “Enhanced regional forecasting considering single wind farm distribution for upscaling,” Journal of Physics: Conference Series, vol. 75, Aug. 2007.
- [63] P. Sanderhoff, “PARK – User’s Guide. A PC-program for calculation of wind turbine park performance,” Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1993.
- [64] “California Wind Energy Forecasting System Development and Testing, Phase 1: Initial Testing,” EPRI Final Report, January 2003.
- [65] K. Mönnich, “Vorhersage der Leistungsabgabe netzeinspeisender Windkraftanlagen zur Unterstützung der Kraftwerkseinsatzplanung,” Ph.D. dissertation, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 2000.
- [66] Ignácio Martí, “Wind Forecasting Activities,” in Proceedings of the First IEA Joint Action Symposium on Wind Forecasting Techniques, published by FOI Swedish Defence Research Agency, Norrköping, Sweden, pp. 11–20, Dec. 2002.
- [67] G. Giebel, L. Landberg, T.S. Nielsen, and H. Madsen, “The Zephyr Project – The Next Generation Prediction System,” poster presentation at the Global Windpower Conference and Exhibition, Paris, France, April 2–5, 2002.
- [68] P.S. Dokopoulos, and M.C. Alexiadis, “Load, Wind, and Hydro Power Forecasting Functions of the More-Care EMS System,” in Proceedings of the 3rd MED POWER Conference 2002, Athens, Greece, Nov. 4–6, 2002.
- [69] G. Dutton, P. Dokopoulos, A. Bakirtzis, J. Stefanakis, A. Gigantidou, P. O’Donnell, D. McCoy, M.J. Fernandes, J.M.S. Cotrim, and A.P. Figueira, “MORE CARE Advice for Secure Operation of Isolated Power Systems with Increased Renewable Energy Penetration & Storage,” in Proceedings of the European Wind Energy Conference EWEC’01, pp. 1142– 1145, Copenhagen, Denmark, June 2–6, 2001.
- [70] B. Lange, “Experiences from the Development of Wind Power Forecasts for Six European TSOs,” presentation at the Second Workshop on Best Practice in the Use of Short- term Forecasting of Wind Power, Madrid, Spain, May 2008.
- [71] IEA Wind Energy Annual Report 2003
- [72] [www.previento.de](http://www.previento.de)
- [73] <http://www.nesea.org/energy/info/wind.html>
- [74] [www.ypen.gr](http://www.ypen.gr)
- [75] [www.enexgroup.gr](http://www.enexgroup.gr)
- [76] <https://windeurope.org/>